



Universidad  
Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Mecánica

PROYECTO FIN DE CARRERA

# **EVOLUCIÓN TECNOLÓGICA EN LA IDENTIFICACIÓN DE AVERÍAS EN SISTEMAS MECÁNICOS**

Autor: DAVID VACAS ROBLEDA

Tutor: JUAN CARLOS GARCÍA PRADA

Leganés, Julio de 2015





## **Agradecimientos**

Ha sido un largo camino hasta tener este proyecto en las manos, y me gustaría agradecer antes de nada a mi tutor D. Juan Carlos García Prada, por darme la oportunidad de hacer este proyecto, ayudarme con la recopilación de información, y sobre todo, por soportarme tantos años y tener siempre una palabra de ánimo

Además, quisiera agradecer su apoyo a Nacho y Vicky, con quienes empecé este camino, y sin ellos esto no hubiera sido posible. Gracias por los buenos momentos que hemos pasado juntos, y tener siempre una palabra amiga.

Por último, a mi madre y Ángel, que han soportado todo el proceso, y sin su apoyo y ayuda no hubiera sido capaz de alcanzar la meta.



# **Resumen**

El principal objetivo de este proyecto es investigar los avances que se han producido en los últimos años en las técnicas de análisis de vibraciones de sistemas rotativos.

Como es imposible abarcar en un solo proyecto todos los sistemas rotativos, nos vamos a centrar en los rodamientos, ya que, aunque son elementos baratos en comparación con otros, son los más susceptibles de fallar por los esfuerzos que soportan, y su ruptura muchas veces imposibilita el uso de las máquinas. Esto ha generado que en los últimos años se haya invertido numerosos recursos para intentar detectar los defectos lo antes posible, y de la manera más eficaz.

Para estudiar la evolución de las técnicas nos vamos a apoyar principalmente en los trabajos, proyectos y tesis publicadas en la Universidad Carlos III en los últimos años. Con esta información podremos hacer una recopilación de las distintas técnicas y explicaremos las características y los ámbitos de aplicación de cada una de ellas.

Nuestro punto de partida para este proyecto va a ser la tesis “Catálogo de identificación de averías a través del análisis espectral”, realizada por D. Carlos José Roda Vázquez en 1995. En los momentos en que se publicó la tesis, se convirtió en un estupendo resumen del estado de la técnica que se usaba para el análisis de vibraciones dentro del marco del mantenimiento preventivo en aplicaciones industriales.

Las otras tesis que vamos a estudiar con profundidad son las pertenecientes a D. Higinio Rubio Alonso (2003), D. Omar José Lara Castro (2007), D. José María Marín López (2009) y D<sup>a</sup>. María Jesús Gómez García (2014).

Compararemos la forma que tienen de tratar las señales vibratorias para caracterizar posibles defectos, y buscaremos tanto los puntos comunes como las particularidades de cada una de las tesis.



# Índice

## Agradecimientos

## Resumen

## Índice de figuras

## Índice de tablas

## Introducción

1. Objetivos del proyecto. . . . .	3
2. Plan del presente proyecto. . . . .	4
3. Estructura del proyecto. . . . .	5

## PARTE I: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 1. El Mantenimiento industrial

1. Concepto y necesidad de mantenimiento. . . . .	15
2. Tipos principales de mantenimiento. . . . .	16
3. Otros conceptos y tipos de mantenimiento. . . . .	20
4. Estado del mantenimiento en 1995. . . . .	20
5. Estado actual del mantenimiento. . . . .	21

### 2. El mantenimiento predictivo y la técnica del análisis de vibraciones

1. El mantenimiento predictivo. . . . .	27
2. El análisis de vibraciones. . . . .	32
3. Estado de la técnica del análisis de vibraciones. . . . .	34

### 3. Técnicas aplicables al análisis de señales de vibración en 1995

1. Análisis en el dominio de la frecuencia. . . . .	46
1.1. Análisis por Transformada rápida de Fourier (FFT). . . . .	47
1.2. Zoom FFT. . . . .	51
1.3. Demodulaciones o análisis de la envolvente. . . . .	52
1.4. Cepstrum. . . . .	55
1.5. Análisis de órdenes a través de la FFT. . . . .	57
1.6. Análisis de la varianza. . . . .	57
1.7. Potencia y PSD de una señal. . . . .	58
1.8. Spike Energy. . . . .	59

2. Análisis en el dominio temporal. . . . .	61
3. Análisis en el dominio de la amplitud. . . . .	62
3.1. Nivel global de vibración. . . . .	62
3.2. Factor de cresta. . . . .	63
3.3. Kurtosis. . . . .	63
4. Análisis en el dominio tiempo-frecuencia. . . . .	64
5. Orígenes del análisis multivariable. . . . .	65
5.1. Análisis de componentes principales. . . . .	65
5.2. Cluster Analysis. . . . .	66
5.3. Análisis discriminante. . . . .	67

#### **4. Nuevas técnicas aplicables al análisis de señales de vibración**

1. Transformada de Fourier o FT (Fourier Transform). . . . .	72
1.1. Transformada rápida de Fourier o FFT (Fast Fourier Transform). . . . .	75
1.2. Transformada corta de Fourier o TCF. . . . .	76
2. Transformada de Hilbert Huang. . . . .	78
3. Transformada de Wavelet. . . . .	82
3.1. Transformada Wavelet continua (TWC). . . . .	84
3.2. Transformada Wavelet Discreta (TWD). . . . .	87
3.3. Transformada Wavelet Estacionaria (TWE). . . . .	88
4. El Análisis Multirresolución (MRA). . . . .	89
5. Sistemas clasificadores inteligentes. . . . .	94
6. Redes Neuronales Artificiales (RNA's) . . . . .	99

#### **5. Elaboración de los modelos teóricos de vibraciones en rodamientos**

1. El rodamiento. . . . .	120
1.1. Tipos de rodamientos. . . . .	121
1.2. Rodamientos para condiciones especiales. . . . .	133
1.3. Rodamientos empleados. . . . .	136
2. Defectología en rodamientos. . . . .	142
3. Comportamiento vibratorio de los rodamientos con defectos localizados. . . . .	146
3.1. Frecuencias rotacionales. . . . .	147
3.2. Espectro de defectos. . . . .	149
3.3. Evolución espectral del desarrollo de los defectos. . . . .	151
4. Modelos de vibraciones por defectos en rodamientos. . . . .	156

### **PARTE II: COMPARACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS DE ANÁLISIS DE VIBRACIONES**

#### **6. Tesis doctoral de Carlos José Roda Vázquez (1995)**

1. Condiciones de medición y rodamientos utilizados. . . . .	172
2. Técnicas de diagnóstico. . . . .	174
3. Ensayos realizados. . . . .	174

3.1. Defectos simples. . . . .	175
3.2. Espectros temporales de reductores prototipo. . . . .	177
3.3. Banco de ensayos. . . . .	186
3.4. Técnicas TEMPSEL. . . . .	188
3.5. Demodulaciones. . . . .	191
3.6. Espectro antes y después del cambio de rodamiento. . . . .	195
3.7. Influencia de la dirección de registro de la vibración. . . . .	197
3.8. Espectros de rodamientos grandes. . . . .	199
3.9. Espectro de las bombas de agua. . . . .	201
4. Conclusiones. . . . .	204
5. Otras aportaciones. . . . .	210
6. Futuros desarrollos. . . . .	211
 <b>7. Tesis doctoral de Higinio Rubio Alonso (2003)</b>	
1. Condiciones de medición y rodamientos utilizados. . . . .	216
2. Técnicas de diagnóstico. . . . .	221
3. Ensayos realizados. . . . .	222
3.1. Técnicas en el dominio temporal. . . . .	224
3.2. Técnicas en el dominio de la amplitud. . . . .	229
3.3. Técnicas gráficas. . . . .	233
4. Conclusiones. . . . .	243
5. Otras aportaciones. . . . .	244
6. Futuros desarrollos. . . . .	247
 <b>8. Tesis doctoral de José María Marín López (2009)</b>	
1. Condiciones de medición y rodamientos utilizados. . . . .	252
2. Técnicas de diagnóstico. . . . .	255
3. Ensayos realizados. . . . .	256
3.1. Señales experimentales. . . . .	256
3.2. Señales simuladas. . . . .	268
3.3. Contrastación señales experimentales y simuladas. . . . .	280
3.4. Evolución de la potencia espectral total en las señales experimentales. . . . .	281
3.5. Evolución de la potencia espectral total en las señales simuladas. . . . .	283
4. Conclusiones. . . . .	285
5. Otras aportaciones. . . . .	287
6. Futuros desarrollos. . . . .	288
 <b>9. Tesis doctoral de Omar José Lara Castro (2007)</b>	
1. Condiciones de medición y rodamientos utilizados. . . . .	292
2. Técnicas de diagnóstico. . . . .	294
3. Ensayos realizados. . . . .	295
3.1. Análisis Wavelet (DWT-MRA). . . . .	297
3.2. Selección de patrones. . . . .	300
3.3. Diagnóstico de la condición de rodamientos mediante redes neuronales. . . . .	303
3.4. Resultados de la aplicación de sistemas clasificadores. . . . .	332

4. Conclusiones. . . . .	334
5. Otras aportaciones. . . . .	337
6. Futuros desarrollos. . . . .	337

#### **10. Tesis doctoral de María Jesús Gómez García (2014)**

1. Condiciones de medición y rodamientos utilizados. . . . .	342
2. Técnicas de diagnóstico. . . . .	343
3. Ensayos realizados. . . . .	343
4. Conclusiones. . . . .	347
5. Otras aportaciones. . . . .	348
6. Futuros desarrollos. . . . .	349

#### **11. Conclusiones**

1. Conclusiones por capítulo. . . . .	357
2. Conclusiones. . . . .	370
3. Futuros desarrollos. . . . .	371

#### **Bibliografía**

#### **Anexo**



# Índice de figuras

**Figura 1.1.-** Clasificación de las estrategias de mantenimiento en función de su relación coste-beneficio y de la dificultad para su implantación.

**Figura 1.2.-** Tendencias en la gestión de mantenimiento.

**Figura 2.1.-** Principales técnicas de análisis utilizadas en el mantenimiento predictivo.

**Figura 2.2.-** Análisis termográfico de un interruptor.

**Figura 2.3.-** Análisis por ultrasonidos.

**Figura 2.4.-** Análisis de aceites. Presencia de partículas sólidas.

**Figura 2.5.-** Estudio de análisis eléctrico.

**Figura 2.6.-** Evolución del nivel de vibración en una máquina.

**Figura 3.1.-** Representación temporal y frecuencial de la vibración producida por un diapasón, el pistón de un motor y una máquina compleja.

**Figura 3.2.-** Representación gráfica de la DFT de una de una serie finita.

**Figura 3.3.-** Representación gráfica del error por solapamiento o “aliasing” al aplicar la DFT a una señal.

**Figura 3.4.-** Representación gráfica de una función cosenoidal, una función cosenoidal truncada y sus respectivos espectros.

**Figura 3.5.-** Señal senoidal, señal modulada en amplitud, y señal modulada en frecuencia.

**Figura 3.6.-** Representaciones gráficas de diferentes técnicas de tratamiento y análisis de la señal vibratoria, en el dominio temporal y frecuencial.

**Figura 3.7.-** Esquema del proceso realizado en el análisis mediante Cepstrum.

**Figura 3.8.-** Espectro de potencia de una señal de una máquina con defectos, y Cepstrum de una señal.

**Figura 3.9.-** Esquema del proceso de análisis de una señal vibratoria mediante Spike Energy

**Figura 3.10.-** Proceso de obtención del valor pico a pico y del espectro mediante Spike Energy.

**Figura 3.11.-** Ejemplo de cluster analysis.

**Figura 3.10.-** Ejemplo de diagrama de análisis discriminante.

**Figura 4.1.-** Análisis tiempo-frecuencia de varias señales.

**Figura 4.2.-** Representación FFT de una señal compleja.

**Figura 4.3.-** Procesamiento de una señal vibratoria con la Transformada Rápida de Fourier.

**Figura 4.4.-** Representación STFT de una señal musical.

**Figura 4.5.-** Ejemplo del proceso “Shifting” en su primera iteración.

**Figura 4.6.-** Descomposición Modal Empírica de una señal.

**Figura 4.7.-** Familias de Wavelets madre más empleadas.

**Figura 4.8.-** Esquema de la aplicación de la Transformada Wavelet.

**Figura 4.9.-** Procesamiento de una señal vibratoria, TWC.

**Figura 4.10.-** Señal sinusoidal y su transformada wavelet.

**Figura 4.11.-** Transformada Wavelet Estacionaria con dos niveles de descomposición.

**Figura 4.12.-** Comparación de la ventana de transformación de una STFT y una WT.

**Figura 4.13.-** Banco de filtros de dos canales.

**Figura 4.14.-** Esquema del MRA que genera la Descomposición Wavelet.

**Figura 4.15.-** Diagrama de descomposición por paquetes Wavelets.

**Figura 4.16.-** Neurona Artificial y Neurona real.

Figura 4.17.- Estructura básica de una neurona.

Figura 4.18.- Red neuronal típica de tres capas.

Figura 4.19.- Diagrama esquemático del entrenamiento supervisado de una ANN.

Figura 4.20.- Clasificación de las redes neuronales.

Figura 4.21.- Topología de una red perceptrón multicapa.

Figura 4.22.- Topología de una red de base radial.

Figura 4.23.- Topología de una red competitiva.

Figura 4.24.- Topología de una red SOM.

Figura 4.25.- Topología de una red de Hopfield.

Figura 5.1.- Elementos que componen un rodamiento de rodillos.

Figura 5.2.- Rodamiento de bolas seccionado.

Figura 5.3.- Tipos de rodamientos radiales.

Figura 5.4.- Tipos de rodamientos axiales.

Figura 5.5.- Tipos de rodamientos mixtos.

Figura 5.6.- Rodamientos rígidos.

Figura 5.7.- Explosión de un rodamiento rígido de una hilera de bolas.

Figura 5.8.- Rodamiento rígido de una hilera de bolas con escote de llenado.

Figura 5.9.- Rodamiento rígido de dos hilera de bolas.

Figura 5.10.- Ángulo de contacto en rodamientos de bolas con contacto angular.

Figura 5.11.- Rodamientos de una hilera y dos hileras de bolas con contacto angular.

Figura 5.12.- Rodamientos de bolas con cuatro puntos de contacto.

Figura 5.13.- Rodamiento de bolas a rótula.

Figura 5.14.- Rodamiento de rodillos cilíndricos de empuje.

Figura 5.15.- Rodamientos de rodillos cónicos.

Figura 5.16.- Corona de agujas.

Figura 5.17.- Rodamientos con casquillo de agujas sin fondo y con fondo.

Figura 5.18.- Rodamientos de agujas con aro mecanizado, sin aro interior y con aro interior.

Figura 5.19.- Rodamiento de agujas autolineables, sin aro y con aro interior.

Figura 5.20.- Rodamiento con sensor.

Figura 5.21.- Rodamiento con Solid Oil.

Figura 5.22.- Rodamientos de material polimérico.

Figura 5.23.- Rodamiento FAG modelo 7206B

Figura 5.24.- Rodamiento SKF 6206 de 9 bolas.

Figura 5.25.- Caja de engranajes del banco de ensayos.

Figura 5.26.- Esquema de la caja de engranajes.

Figura 5.27.- Principales causas de defectos en rodamientos.

Figura 5.28.- Parámetros cinemáticos del rodamiento.

Figura 5.29.- Rodamientos con defectos en pista interna.

Figura 5.30.- Rodamientos con defecto en pista externa.

Figura 5.31.- Rodamientos con defecto en bola.

Figura 5.32.- Espectro de frecuencia característico de la vibración generada por un rodamiento con defectos.

Figura 5.33.- Espectro representativo del estado I de la evolución del defecto en el rodamiento.

Figura 5.34.- Espectro representativo del estado II de la evolución del defecto en el rodamiento.

Figura 5.35.- Espectro representativo del estado III de la evolución del defecto en el rodamiento.

Figura 5.36.- Espectro representativo del estado IV de la evolución del defecto en el rodamiento.

- Figura 6.1.- Caja de engranajes.
- Figura 6.2.- Espectro en aceleración rodamiento de doble hilera.
- Figura 6.3.- Señal de velocidad.
- Figura 6.4.- Espectro en aceleración en punta M1-H en eje de entrada.
- Figura 6.5.- Zoom de zona A.
- Figura 6.6.- Zoom zona B (rodamiento de bolas).
- Figura 6.7.- Espectro medio de todos los reductores prototipo de la mina.
- Figura 6.8.- Potencia espectral acumulada.
- Figura 6.9.- Espectro con rodamientos estado 3.
- Figura 6.10.- Gráfica de tendencia y cascada temporal de espectros.
- Figura 6.11.- Espectro temporal.
- Figura 6.12.- Gráfica de tendencia y cascada temporal de espectros.
- Figura 6.13.- Espectro temporal.
- Figura 6.14.- Gráfica de tendencia y cascada temporal de espectros.
- Figura 6.15.- Espectro temporal.
- Figura 6.16.- Gráfica de tendencia y cascada temporal de espectros.
- Figura 6.17.- Potencia del espectro.
- Figura 6.18.- Espectro temporal.
- Figura 6.19.- Zoom del espectro temporal.
- Figura 6.20.- Espectro temporal con holgura excesiva.
- Figura 6.21.- Tendencia y cascada con holgura excesiva.
- Figura 6.22.- Espectro en velocidad reductor banco de ensayos, M6 deteriorado.
- Figura 6.23.- Cepstrum del espectro anterior.
- Figura 6.24.- Cepstrum rectificado del espectro anterior.
- Figura 6.25.- Espectro reductor banco de ensayos.
- Figura 6.26.- Espectro filtrado Cepstrum.
- Figura 6.27.- Espectro de frecuencias síncronas.
- Figura 6.28.- Espectro de resonancias sobre espectro original.
- Figura 6.29.- Espectro en puntos del reductor.
- Figura 6.30.- Demodulación obtener frecuencia rodamiento M3.
- Figura 6.31.- Señal temporal punto 4.
- Figura 6.32.- Espectro temporal punto 4.
- Figura 6.33.- Demodulación banda de resonancia.
- Figura 6.34.- Señal temporal.
- Figura 6.35.- Espectro señal.
- Figura 6.36.- Demodulación banda de resonancia.
- Figura 6.37.- Señal temporal.
- Figura 6.38.- Espectro señal.
- Figura 6.39.- Demodulación banda rodamientos M1.
- Figura 6.40.- Espectro antes del cambio de rodamientos.
- Figura 6.41.- Espectro temporal después de cambiar.
- Figura 6.42.- Cascada de espectros.
- Figura 6.43.- Espectro en aceleración bomba con holgura.
- Figura 6.44.- Evolución temporal en horizontal.
- Figura 6.45.- Espectro en aceleración horizontal.
- Figura 6.46.- Evolución temporal en vertical.
- Figura 6.47.- Espectro temporal.
- Figura 6.48.- Espectro en velocidad tambor de arrastre cinta transportadora.
- Figura 6.49.- Evolución espectro de la cascada espectral.
- Figura 6.50.- Espectro en aceleración tambor de arrastre cinta transportadora.
- Figura 6.51.- Evolución espectro de la cascada espectral.

Figura 6.52.- Espectro bomba antes y después cambio rodamiento.

Figura 6.53.- Espectro bomba antes y después cambio rodamiento.

Figura 6.54.- Espectro rodamiento 4 antes y después cambio rodamiento.

Figura 6.55.- Espectro rodamiento 4 antes y después cambio rodamiento.

Figura 6.56.- Espectro de bomba con desalineamiento.

Figura 6.57.- Espectro de bomba con desalineamiento.

Figura 6.58.- Modelos espectrales de defectos estudiados.

Figura 6.59.- Diagrama lógico de diagnóstico.

Figura 7.1.- Banco de ensayos de rodamientos.

Figura 7.2.- Elementos que componen el banco de ensayos de rodamientos.

Figura 7.3.- Banco de ensayos, modelo a escala de un grupo accionador industrial.

Figura 7.4.- Caja de engranajes del banco de ensayos.

Figura 7.5.- Ejemplo de las gráficas temporales para el estado de carga: FRADIAL= 6bar y FAXIAL = 6 bar.

Figura 7.6.- Señal temporal de vibración correspondiente a un registro del rodamiento Gini05i3.

Figura 7.7.- Evolución (como sucesión de tramos) de la señal vibratoria en el tiempo de un registro del rodamientos con nivel de defecto de 5 mm.

Figura 7.8.- Señales temporales correspondientes a 5 rodamientos con tamaños de defecto distinto.

Figura 7.9.- Zoom de la señal temporal de vibración correspondiente a un registro del rodamiento Gini05i3.

Figura 7.10.- Gráfica temporal del valor absoluto de la envolvente de un registro en el estado de carga r2a3.

Figura 7.11.- Gráfica temporal del valor absoluto de la envolvente del PeakVue de un registro en el estado de carga r2a3.

Figura 7.12.- Representación de la MEDIA: carga radial frente a carga axial.

Figura 7.13.- Representación del VALOR MÁXIMO: carga radial frente a carga axial.

Figura 7.14.- Espectros de potencia de una medida en desplazamiento, velocidad y aceleración.

Figura 7.15.- Evolución de la potencia de la señal de vibración para los distintos tamaños de defecto.

Figura 7.16.- Evolución de la potencia espectral de las vibraciones de rodamientos con defecto en anillo exterior situado en tres zonas con diferentes cargas y a varias velocidades del eje.

Figura 7.17.- Interpretación del espectro de potencia como valor cuadrático del valor eficaz.

Figura 7.18.- Ejemplos de espectro de potencia de rodamientos sin defecto.

Figura 7.19.- Ejemplo de espectros de potencia mediante la FFT (PSD).

Figura 7.20.- Mapa de espectros de potencia de la señal vibratoria de la reductora, sentido radial, Estado 1.

Figura 7.21.- Representación conjunta de los 30 mayores valores de PSD normalizada en los puntos 1A, 1R y 2R para una velocidad de 7,5 Hz (con defecto).

Figura 7.22.- Proceso aplicado para determinar el espectro de potencia de la envolvente.

Figura 7.23.- Ejemplo de espectro de la envolvente de la señal de vibración rodamiento dañado (gini02i3).

Figura 7.24.- Proceso seguido por la técnica de análisis mediante Cepstrum.

Figura 7.25.- Ejemplo de Cepstrum de la señal de vibración de un rodamiento dañado.

Figura 7.26.- Curvas wavelet de la familia Daubechies.

Figura 7.27.- Curvas wavelet de la familia Symlet.

Figura 7.28.- Diagrama tiempo-frecuencia plano (variante para el espectro de la envolvente) del rodamiento gini05i1.

Figura 7.29.- Diagrama tiempo-frecuencia para rodamientos sin defecto, a una velocidad del eje de 1200 rpm.

Figura 7.30.- Evolución de la potencia espectral de la señal emitida por los rodamientos con defectos de diferentes tamaños, en el banco de rodamientos y en la reductora industrial, a varias velocidades del eje.

Figura 7.31.- Influencia de la zona de carga en la señal de vibración emitida por u rodamiento con fallo puntual localizado en su pista interior.

Figura 7.32.- Evolución de la potencia espectral de las vibraciones emitidas por un rodamiento con defecto de diferentes tamaños, en el modelo implementado en código ALGOR.

- Figura 8.1.- Banco de ensayos usado para las señales experimentales.
- Figura 8.2.- Brida o alojamiento del rodamiento.
- Figura 8.3.- Señal temporal de un rodamiento SKF 6206 con defecto en la pista interna, con 3 bolas.
- Figura 8.4.- Envolvente de la señal temporal de un rodamiento SKF 6206 con defecto en la pista interna, con 3 bolas.
- Figura 8.5.- Espectro de la señal temporal representada.
- Figura 8.6.- Espectro de la envolvente de la señal temporal.
- Figura 8.7.- Frecuencias características sobre el espectro de la envolvente de la señal temporal.
- Figura 8.8.- Mapa wavelet de la señal temporal y de la envolvente de la señal temporal.
- Figura 8.9.- Señal temporal de un rodamiento SKF 6206 con defecto en la pista externa, con 9 bolas.
- Figura 8.10.- Envolvente de la señal temporal de un rodamiento SKF 6206 con defecto en la pista externa, con 9 bolas.
- Figura 8.11.- Espectro de la señal temporal.
- Figura 8.12.- Espectro de la envolvente de la señal temporal.
- Figura 8.13.- Frecuencias características sobre el espectro de la envolvente de la señal temporal.
- Figura 8.14.- Mapa wavelet de la señal temporal y de la envolvente de la señal temporal.
- Figura 8.15.- Señales temporales correspondientes a rodamientos de 3 y 9 bolas.
- Figura 8.16.- Espectro de las señales temporales correspondientes a rodamientos de 3 y 9 bolas.
- Figura 8.17.- Espectro de las envolventes de las señales temporales correspondientes a rodamientos de 3 y 9 bolas.
- Figura 8.18.- Mapa wavelet de la señal temporal y mapa wavelet de la envolvente de la señal temporal del rodamiento de 3 bolas.
- Figura 8.19.- Mapa wavelet de la señal temporal y mapa wavelet de la envolvente de la señal temporal del rodamiento de 9 bolas.
- Figura 8.20.- Señales temporales correspondientes a rodamientos con distintos defectos.
- Figura 8.21.- Espectros de las señales temporales.
- Figura 8.22.- Espectros de las envolventes de las señales temporales.
- Figura 8.23.- Mapa wavelet de la señal temporal, sin defecto y con defecto en pista externa.
- Figura 8.24.- Mapa wavelet de la señal temporal con defecto en pista interna.
- Figura 8.25.- Señal temporal de un modelo de rodamiento con defecto en la pista interna, con 9 bolas.
- Figura 8.26.- Envolvente de la señal temporal de un modelo de rodamiento con defecto en la pista interna, con 9 bolas.
- Figura 8.27.- Espectro de la señal temporal.
- Figura 8.28.- Espectro de la envolvente de la señal temporal.
- Figura 8.29.- Frecuencias características sobre el espectro de la envolvente de la señal.
- Figura 8.30.- Mapa wavelet de la señal temporal y mapa wavelet de la envolvente de la señal temporal.
- Figura 8.31.- Señal temporal de un modelo de rodamiento con defecto en la pista externa, con 9 bolas.
- Figura 8.32.- Envolvente de la señal temporal de un modelo de rodamiento con defecto en la pista externa, con 9 bolas.
- Figura 8.33.- Espectro de la señal temporal.
- Figura 8.34.- Espectro de la envolvente de la señal temporal.
- Figura 8.35.- Frecuencias características sobre el espectro de la envolvente de la señal temporal.
- Figura 8.36.- Mapa wavelet de la señal temporal y mapa wavelet de la envolvente de la señal temporal.
- Figura 8.37.- Señales temporales correspondientes a modelos de rodamientos de 3 y 9 bolas.
- Figura 8.38.- Espectros de las señales temporales correspondientes a modelos de rodamientos de 3 y 9 bolas.
- Figura 8.39.- Espectros de las envolventes de las señales temporales.
- Figura 8.40.- Mapa wavelet de la señal temporal y mapa wavelet de la envolvente de la señal temporal en un rodamiento de 3 bolas.

**Figura 8.41.- Mapa wavelet de la señal temporal y mapa wavelet de la envolvente de la señal temporal en un rodamiento de 9 bolas.**

**Figura 8.42.- Señales temporales correspondientes a modelos de rodamientos con distintos defectos.**

**Figura 8.43.- Espectro de las señales temporales.**

**Figura 8.44.- Espectros de las envolventes de las señales temporales.**

**Figura 8.45.- Mapas wavelets de las señales temporales, sin defecto y en pista externa.**

**Figura 8.46.- Mapa wavelet de la señal temporal con defecto en pista interna.**

**Figura 8.47.- Señales temporales de un modelo de rodamiento de nueve bolas, con defecto en la pista externa, girando a distintas velocidades.**

**Figura 8.48.- Espectros de las señales temporales.**

**Figura 8.49.- Espectros de las envolventes de las señales temporales.**

**Figura 8.50.- Mapa wavelet de la señal temporal a 300 y 600 rpm.**

**Figura 8.51.- Mapa wavelet de la señal temporal a 1200 y 1800 rpm.**

**Figura 8.52.- Mapa wavelet de la señal temporal a 2400 rpm.**

**Figura 8.53.- Señal temporal de un rodamiento real con defecto en la pista externa, y señal simulada de un modelo de rodamiento con 9 bolas con defecto en la pista externa.**

**Figura 8.54.- Espectros de las señales temporales experimental y simulada.**

**Figura 8.55.- Frecuencias características sobre el espectro de la envolvente de la señal, real y simulada.**

**Figura 8.56.- Evolución de la Potencia Espectral con la velocidad de giro, para diferentes cargas y con la carga, para diferentes velocidades de giro.**

**Figura 8.57.- Evolución de la Potencia Espectral con la velocidad de giro, para diferentes cargas y con la carga, para diferentes velocidades de giro.**

**Figura 8.58.- Evolución de la Potencia Espectral con la velocidad de giro, para diferentes cargas y con la carga, para diferentes velocidades de giro.**

**Figura 8.59.- Evolución de la Potencia Espectral con la velocidad de giro, para diferentes cargas y con la carga, para diferentes velocidades de giro.**

**Figura 8.60.- Evolución de la Potencia Espectral con la velocidad de giro, para diferentes cargas y con la carga, para diferentes velocidades de giro.**

**Figura 8.61.- Evolución de la Potencia Espectral con la velocidad de giro, para diferentes cargas y con la carga, para diferentes velocidades de giro.**

**Figura 8.62.- Diagrama de bloques del desarrollo de la tesis.**

**Figura 8.63.- Secuencia seguida en la simulación térmica.**

**Figura 9.1.- Banco de ensayos.**

**Figura 9.2.- Diagrama general de los resultados experimentales.**

**Figura 9.3.- Señales temporales de cada condición estudiada a 600 RPM (i) normal, (ii) def. pista interna, (iii) def. bola, (iv) def. pista externa.**

**Figura 9.4.- Señales temporales de cada condición estudiada a 1200 RPM (i) normal, (ii) def. pista interna, (iii) def. bola, (iv) def. pista externa.**

**Figura 9.5.- Señales temporales de cada condición estudiada a 1800 RPM (i) normal, (ii) def. pista interna, (iii) def. bola, (iv) def. pista externa.**

**Figura 9.6.- Wavelet Daubechies 6.**

**Figura 9.7.- Comparación de la descomposición Wavelet de nivel 5 de un Rodamiento sin defecto y otro con defecto en su pista interna para 600 RPM.**

**Figura 9.8.- Comparación de la descomposición Wavelet de nivel 5 de un Rodamiento sin defecto y otro con defecto en bola para 600 RPM.**

**Figura 9.9.- Comparación de la descomposición Wavelet de nivel 5 de un Rodamiento sin defecto y otro con defecto en su pista externa para 600 RPM.**

Figura 9.10.- Coeficientes de detalle 5 (Dc5) para cada condición estudiada a 600 RPM. (i) normal, (ii) def. pista interna, (iii) def. bola, (iv) def. pista externa.

Figura 9.11.- Coeficientes de detalle 5 (Dc5) para cada condición estudiada a 1200 RPM. (i) normal, (ii) def. pista interna, (iii) def. bola, (iv) def. pista externa.

Figura 9.12.- Coeficientes de detalle 5 (Dc5) para cada condición estudiada a 1800 RPM. (i) normal, (ii) def. pista interna, (iii) def. bola, (iv) def. pista externa.

Figura 9.13.- Diagrama de diagnóstico de defecto para cada rodamiento.

Figura 9.14.- Clasificación de Rodamientos con defecto en pista externa pertenecientes al grupo G1, para una velocidad de giro de 600 RPM.

Figura 9.15.- Clasificación de Rodamientos con defecto en Pista externa pertenecientes al grupo G2, para una velocidad de giro de 600 RPM.

Figura 9.16.- Clasificación de Rodamientos con defecto en Pista interna pertenecientes al Grupo G3, para una velocidad de giro de 1800 RPM.

Figura 9.17.- Evolución general de la eficiencia de redes MLP según el grupo de datos y número de neuronas en la capa oculta utilizados.

Figura 9.18.- Evolución general de la eficiencia de redes MLP de 30 neuronas en su capa oculta, con respecto a la velocidad de giro y al grupo de datos utilizado.

Figura 9.19.- Evolución de la eficiencia de redes MLP de 30 neuronas en su capa oculta, en la clasificación de cuatro condiciones en rodamientos, con respecto a la velocidad de giro y al grupo de datos G1.

Figura 9.20.- Evolución de la eficiencia de redes MLP de 30 neuronas en su capa oculta, en la clasificación de cuatro condiciones en rodamientos, con respecto a la velocidad de giro y al grupo de datos G2.

Figura 9.21.- Evolución de la eficiencia de redes MLP de 30 neuronas en su capa oculta, en la clasificación de cuatro condiciones en rodamientos, con respecto a la velocidad de giro y al grupo de datos G3.

Figura 9.22.- Evolución de la eficiencia de la red según el grupo de datos y la velocidad.

Figura 9.23.- Evolución del entrenamiento a nivel individual de la red RBFG3-600 con 30 neuronas en su capa oculta, según el ancho de su base radial.

Figura 9.24.- Eficiencia absoluta de clasificación para redes RBFG1 a distintas velocidades de giro, según el número de neuronas en su capa oculta.

Figura 9.25.- Eficiencia absoluta de clasificación para redes RBFG2 a distintas velocidades de giro, según el número de neuronas en su capa oculta.

Figura 9.26.- Eficiencia absoluta de clasificación para redes RBFG3 a distintas velocidades de giro, según el número de neuronas en su capa oculta.

Figura 9.27.- Eficiencia de la clasificación de cuatro condiciones en rodamientos para redes PNNG1 a distintas RPM.

Figura 9.28.- Eficiencia de la clasificación de cuatro condiciones en rodamientos para redes PNNG2 a distintas RPM.

Figura 9.29.- Eficiencia de la clasificación de cuatro condiciones en rodamientos para redes PNNG3 a distintas RPM.

Figura 9.30.- Evolución de la eficiencia de clasificación de redes PNN para grupos de datos G1, G2 y G3 a diferentes velocidades de giro.

Figura 9.31.- Diagrama de operación del Sistema Híbrido propuesto.

Figura 9.32.- Evolución de la clasificación general del grupo G1.

Figura 9.33.- Evolución de la clasificación general del grupo G2.

Figura 9.34.- Evolución de la clasificación general del grupo G3.

Figura 9.35.- Esquema general de metodologías de diagnóstico de defectos basadas en redes neuronales individuales.

Figura 9.36.- Esquema general de la metodología de diagnóstico de defectos basada en sistemas híbridos de clasificación.

**Figura 10.1.- Banco de ensayos utilizado para la toma de medidas. Laboratorio de la UNED.**

**Figura 10.2.- Gráficas para la selección del valor de descomposición óptimo para el caso de rodamientos:**  
(a) Número de neuronas en función del nivel de descomposición. (b) Tasas de acierto obtenidas en función del nivel de descomposición.

**Figura 10.3.- Tasa de acierto (%) para las tres redes entrenadas a las distintas velocidades (Hz):**  
(a) Clasificación de un rodamiento sano (b) Clasificación de un rodamiento con defecto en pista interna.  
(c) Clasificación de un rodamiento con defecto en bola (d) Clasificación de un rodamiento con defecto en pista externa.

**Figura 11.1.- Ejemplo de cluster analysis.**

**Figura 11.2.- Ejemplo de diagrama de análisis discriminante.**

**Figura 11.3.- Modelos espectrales de defectos estudiados.**

**Figura 11.4.- Diagrama de bloques del desarrollo de la tesis.**

**Figura 11.5.- Esquema general de metodologías de diagnosis de defectos basadas en redes neuronales individuales.**

**Figura 11.6.- Esquema general de la metodología de diagnosis de defectos basada en sistemas híbridos de clasificación.**



# Índice de tablas

Tabla 4.1.- Bandas de frecuencia de la Descomposición WP para la señal  $X[n]$ .

Tabla 4.2.- Resumen de las funciones de activación más utilizadas.

Tabla 4.3.- Resumen de las funciones de red más utilizadas en ANN.

Tabla 5.1.- Parámetros geométricos de diseño FAG 7206B.

Tabla 5.2.- Características básicas del rodamiento R1: *SKF 3206ATN9*.

Tabla 5.3.- Características básicas del rodamiento R2: *SKF 22308E*.

Tabla 5.4.- Características básicas del rodamiento R3: *SKF 22208CC*.

Tabla 5.5.- Características básicas del rodamiento R4: *SKF NU208E*.

Tabla 5.6.- Características básicas del rodamiento R5: *SKF 6208*.

Tabla 5.7.- Características básicas del rodamiento R6: *SKF NU208E*.

Tabla 5.8.- Principales daños producidos en rodamientos.

Tabla 6.1.- Síntomas de defecto y técnicas apropiadas.

Tabla 7.1.- Características de los cilindros neumáticos.

Tabla 8.1.- Parámetros de carga-velocidad usados en las simulaciones.

Tabla 9.1.- Organización de los ensayos en subgrupos.

Tabla 9.2.- Número de revoluciones totales registradas para cada señal de 256 datos.

Tabla 9.3.- Número de rodamientos y señales en cada uno de los grupos formados.

Tabla 9.4.- Bandas de Frecuencia para la descomposición Wavelet de nivel 5 de una señal muestreada a 5000 Hz.

Tabla 9.5.- Frecuencias de defecto en pista externa, interna y bola para el rodamiento FAG 7206B a 600,1200 y 1800 RPM de ensayos.

Tabla 9.6.- Bandas de frecuencia que contienen a las frecuencias de defecto en pista externa, interna y bola a 600, 1200 y 1800 RPMs.

Tabla 9.7.- Diseño de la arquitectura de la red MLP utilizada.

Tabla 9.8.- Algoritmos de optimización iterativa no lineal de redes MLP.

Tabla 9.9.- Longitud de datos disponibles para los diferentes grupos de datos.

Tabla 9.10.- Valores numéricos de la salida objetivo o salida esperada.

Tabla 9.11.- Parámetros de diseño del entrenamiento de la red MLP.

Tabla 9.12.- Redes MLP óptimas para diferentes grupos de datos y velocidades.

Tabla 9.13.- Efectividad en la clasificación de rodamientos del grupo G1 con redes MLP.

Tabla 9.14.- Efectividad en la clasificación de rodamientos del grupo G2 con redes MLP.

Tabla 9.15.- Efectividad en la clasificación de rodamientos del grupo G3 con redes MLP.

Tabla 9.16.- Porcentaje de éxito en la clasificación de redes MLP para diferentes grupos de datos y número de neuronas en la capa oculta de ensayos.

Tabla 9.17.- Valores numéricos de la salida objetivo o salida esperada de ensayos.

Tabla 9.18.- Parámetros de diseño del entrenamiento de la red RBF.

Tabla 9.19.- Resultados para redes RBF del grupo G1 con anchura óptima.

Tabla 9.20.- Redes RBF óptimas para diferentes grupos de datos y velocidades.  
 Tabla 9.21.- Efectividad en la clasificación de rodamientos del Grupo G1 con redes RBF.  
 Tabla 9.22.- Efectividad en la clasificación de rodamientos del Grupo G2 con redes RBF.  
 Tabla 9.23.- Efectividad en la clasificación de rodamientos del Grupo G3 con redes RBF.  
 Tabla 9.24.- Parámetros de diseño del entrenamiento de la red PNN.  
 Tabla 9.25.- Resultados de Entrenamiento y Prueba de las redes PNN del grupo G1.  
 Tabla 9.26.- Resultados de Entrenamiento y Prueba de las redes PNN del grupo G2.  
 Tabla 9.27.- Resultados de Entrenamiento y Prueba de las redes PNN del grupo G3.  
 Tabla 9.28.- Redes PNN óptimas para diferentes grupos de datos y velocidades.  
 Tabla 9.29.- Efectividad en la clasificación de rodamientos del grupo G1 con redes PNN.  
 Tabla 9.30.- Efectividad en la clasificación de rodamientos del grupo G2 con redes PNN.  
 Tabla 9.31.- Efectividad en la clasificación de rodamientos del grupo G3 con redes PNN.  
 Tabla 9.32.- Resultados Generales de la Clasificación con redes MLP.  
 Tabla 9.33.- Resultados Generales de la Clasificación con redes RBF.  
 Tabla 9.34.- Resultados Generales de la Clasificación con redes PNN.  
 Tabla 9.35.- Resultados Generales de la Clasificación con Sistemas Híbridos.

Tabla 10.1.- Frecuencias de fallo de los rodamientos FAG 7206 B.  
 Tabla 10.2.- Constantes utilizadas para el diseño de RBFs en rodamientos.  
 Tabla 10.3.- Resultados obtenidos para un *goal* de 0,1.

Tabla 11.1.- Espectro rodamiento nuevo frente a espectro garra vacía.  
 Tabla 11.2.- Síntomas de defecto y técnicas apropiadas.  
 Tabla 11.3.- Número de rodamientos y señales en cada uno de los grupos formados.  
 Tabla 11.4.- Resultados Generales de la Clasificación con redes MLP.  
 Tabla 11.5.- Resultados Generales de la Clasificación con redes RBF.  
 Tabla 11.6.- Resultados Generales de la Clasificación con redes PNN.  
 Tabla 11.7.- Resultados Generales de la Clasificación con Sistemas Híbridos.  
 Tabla 11.8.- Resultados obtenidos para un goal de 0,1.



# INTRODUCCIÓN



## **1. OBJETIVOS DEL PROYECTO**

El principal objetivo de este proyecto es investigar los avances que se han producido sobre todo en las técnicas de análisis de vibraciones.

Aunque el primer paso fue dado por D. Juan Carlos García Prada con su tesis “Análisis de armónicos según órdenes de rotación en sistemas mecánicos”, publicada en 1991, de ella sólo vamos a hablar ligeramente, y nuestro punto de partida para este proyecto va a ser la tesis “Catálogo de identificación de averías a través del análisis espectral”, realizada por D. Carlos José Roda Vázquez en 1995.

En los momentos en que se publicó la tesis, se convirtió en un estupendo resumen del estado de la técnica que se usaba para el análisis de vibraciones dentro del marco del mantenimiento preventivo en aplicaciones industriales. Por ello, en primer lugar hay que estudiar, resumir y analizar toda la información que presenta la tesis, y aunque la citada tesis abarca el análisis en engranajes, rodamientos y conjuntos completos, nosotros nos centraremos en el análisis de vibraciones en rodamientos, por ser la principal fuente de fallos de las máquinas industriales actuales.

Para estudiar la evolución de las técnicas nos vamos a apoyar principalmente en los trabajos, proyectos y tesis publicadas en la Universidad Carlos III en los últimos años. Con esta información podremos hacer una recopilación de las distintas técnicas y explicaremos las características y los ámbitos de aplicación de cada una de ellas.

Las otras tesis que vamos a estudiar con profundidad son las pertenecientes a D. Higinio Rubio Alonso (2003), D. Omar José Lara Castro (2007), D. José María Marín López (2009) y D<sup>a</sup>. María Jesús Gómez García (2014).

Compararemos la forma que tienen de tratar las señales vibratorias para caracterizar posibles defectos, y buscaremos tanto los puntos comunes como las particularidades de cada una de las tesis.

Además, intentaremos abrir nuevos caminos para futuros desarrollos.



## **2. PLAN DEL PRESENTE PROYECTO**

Los pasos principales y la estrategia seguida para el desarrollo de este proyecto y la consecución de los objetivos perseguidos se pueden resumir en los siguientes puntos:

- 1.- Obtención, estudio y análisis de las tesis y sus anexos.
- 2.- Estructuración del trabajo con las temas a tratar y presentación del proyecto.
- 3.- Acopio de documentación técnica e informaciones relacionadas con los temas:
  - El mantenimiento: definición, evolución y tipos más significativos.
  - El mantenimiento predictivo: características, técnicas más empleadas.
  - El análisis de vibraciones: evolución, técnicas más significativas.
  - Los rodamientos: sus características, funcionamiento, defectología y modelos más significativos.
- 4.- Análisis pormenorizado de las informaciones obtenidas.
- 5.- Análisis y resumen de las tesis y sus resultados experimentales.
- 6.- Extracción de conclusiones de las tesis individuales.
- 7.- Extracción de las conclusiones generales del proyecto a partir de las tesis individuales.
- 8.- Redacción del proyecto.



### **3. ESTRUCTURA DEL PROYECTO**

El presente Proyecto Fin de Carrera consta de 11 capítulos, que se han estructurado en 2 partes, una primera con los fundamentos teóricos y una segunda con las tesis que vamos a estudiar. Además, introduciremos un anexo donde haremos un pequeño resumen de la tesis de Juan Carlos García Prada.

Los capítulos son los siguientes:

#### **- Introducción**

Se abordará una breve introducción al PFC y se definirán los objetivos que se persiguen, así como el ámbito en el cual se desarrolla y la motivación del mismo. Además, se describirán las fases del desarrollo y la estructura del proyecto.

### **PARTE 1: FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

Esta parte abarca desde el capítulo 1 al capítulo 5, y en él se encuentran los principales conceptos de mantenimiento, la explicación de las técnicas que se usarán en las distintas tesis, los modelos fundamentales que se han desarrollado, y los demás fundamentos teóricos necesarios, así como su desarrollo a lo largo de los años.

#### **- Tema 1: El mantenimiento industrial**

En este capítulo se analizan la evolución y características principales de los diferentes tipos de mantenimiento industrial.

Además, se realiza una comparación del mantenimiento en el contexto de la tesis, y una reseña histórica de la evolución desde esos años hasta la actualidad.

#### **- Tema 2: El mantenimiento predictivo y la técnica de análisis de vibraciones**

En este capítulo nos centramos en el mantenimiento predictivo; se verán las distintas técnicas que se usan para dicho mantenimiento, aunque nos centraremos en el análisis de vibraciones.

Además, explicaremos la evolución que ha llevado a cabo las distintas técnicas usadas para el análisis de vibraciones.



### **- Tema 3: Técnicas aplicables al análisis de señales de vibración en 1995**

En este capítulo se hará un resumen del estado de la técnica de acuerdo a las usadas en la tesis de D. Carlos José Roda Vázquez, y se tomará como punto de partida para la explicación de las técnicas aplicables al análisis de vibraciones.

Se abordan los análisis desde el punto de vista frecuencial, con una primera aproximación a la transformada de Fourier, pero además se explicará el análisis temporal, y de la amplitud.

### **- Tema 4: Nuevas técnicas aplicables al análisis de señales de vibración**

En este capítulo se expondrán las nuevas técnicas de análisis de vibraciones, sobre todo tiempo-frecuencia.

Primeramente, se expondrá la Transformada Rápida de Fourier (ya introducida en el capítulo anterior), con las últimas variantes y herramientas empleadas para un mejor análisis y clasificación de las señales.

Posteriormente, se desarrollará la Transformada Wavelet centrándose en el filtrado unidimensional de la Transformada Wavelet Estacionaria y también se detallará la Transformada Hilbert-Huang.

Además, se introducirán las características principales y el desarrollo del Análisis Multirresolución (MRA).

Por último, desarrollan las tendencias actuales de diagnosis de defectos y los sistemas clasificadores más utilizados en este campo, haciendo énfasis en las Redes Neuronales Artificiales (ANN).

### **- Tema 5: Elaboración de los modelos teóricos de vibraciones en rodamientos**

En este capítulo se exponen las características y tipos principales de los rodamientos, así como los rodamientos empleados en las distintas tesis.

Además, estudiamos el comportamiento de los rodamientos con presencia de defectos, y los modelos que se utilizan para caracterizarlos.





## PARTE 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Esta parte abarca desde el capítulo 6 al capítulo 10, y en él se analizan las tesis, exponiendo los resultados y las conclusiones. Se compararán las técnicas de acuerdo con varias tesis para ver la evolución de las técnicas desde 1995 hasta la actualidad.

### **- Tema 6: Tesis doctoral de Carlos José Roda Vázquez (1995)**

Este capítulo es una síntesis de la tesis doctoral de Carlos José Roda Vázquez, publicada en 1995, donde se estudian los defectos en cajas de engranajes (engranajes y rodamientos) en un reductor real, usando sus señales reales, y comparando los resultados con los obtenidos en un banco de ensayos que es su modelo a escala. Vamos a considerar sólo la parte concerniente a los rodamientos.

### **- Tema 7: Tesis doctoral de Higinio Rubio Alonso (2003)**

Este capítulo sintetiza la tesis de Higinio Rubio Alonso, publicada en 2003, con muchos elementos comunes con la tesis inicial, pero que se centra en la defectología en rodamientos en el banco a escala del reductor industrial, en un banco de ensayos de rodamientos, y además con modelos de simulación mediante elementos finitos, implementados en códigos ALGOR y MATLAB, abriendo una nueva vía de investigación.

### **- Tema 8: Tesis doctoral de José María Marín López (2009)**

En este capítulo se resume la parte de la tesis de José María Marín López que trata de la defectología en rodamientos mediante el análisis de vibraciones. Realiza además un estudio muy interesante del comportamiento térmico de los rodamientos, pero que desafortunadamente en este trabajo no vamos a considerar.

### **- Tema 9: Tesis doctoral de Omar José Lara Castro (2007)**

Este capítulo resume la tesis de Omar José Lara Castro, publicada en 2007, y centrada en la caracterización de los defectos en rodamientos en un banco de ensayos, que se realiza mediante el análisis multirresolución y el uso de redes neuronales.



**- Tema 10: Tesis doctoral de María Jesús Gómez García (2014)**

En este capítulo se va a resumir la parte relativa a la caracterización de defectos que hay en la tesis doctoral de María Jesús Gómez García. El trabajo principal de esta tesis se ha realizado para la caracterización de defectos en ejes, y una vez que se ha desarrollado un método eficaz, se ha comprobado su comportamiento con los datos de los ensayos realizados por Omar José Lara Castro.

**- Tema 11: Conclusiones**

En este capítulo vamos a exponer las conclusiones finales del proyecto:

En primer lugar, vamos a realizar una valoración sobre los fundamentos teóricos del trabajo y su parte teórica.

En segundo lugar, vamos a tratar de extraer unas conclusiones individuales de cada una de las tesis, que nos van a servir para compararlas, y hacer una valoración general.

Por último, se elaborará una propuesta sobre futuros desarrollos o líneas de investigación que quedan abiertas.

**- Bibliografía**

Lista de los documentos más relevantes que se han utilizado para la realización de este proyecto: libros, tesis doctorales, revistas, cursos, artículos, páginas web, etc.

**- Anexo**

En el anexo se hará un pequeño resumen de la tesis de Juan Carlos García Prada, publicada en 1991, y que fue la precursora y germen de las tesis que nos ocupan en este proyecto.



# **PARTE I:**

# **FUNDAMENTOS TEÓRICOS**





Esta parte se exponen los principales conceptos, fundamentos, técnicas y modelos que veremos desarrollado en el trabajo.

Consta de los siguientes capítulos:

- Tema 1: El mantenimiento industrial
- Tema 2: El mantenimiento predictivo y la técnica de análisis de vibraciones
- Tema 3: Técnicas aplicables al análisis de señales de vibración en 1995
- Tema 4: Nuevas técnicas aplicables al análisis de señales de vibración
- Tema 5: Elaboración de los modelos teóricos de vibraciones en rodamientos

La información que hay en estos capítulos es fundamental para entender la segunda parte del proyecto.





# **TEMA 1:**

## **EL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL**





## 1. CONCEPTO Y NECESIDAD DE MANTENIMIENTO

En un sistema compuesto por múltiples elementos sometidos a requerimientos mecánicos intensos, a pesar de las exigencias de fabricación, es común el desarrollo de defectos. El fallo de alguno de los componentes puede arrastrar a la inutilización del sistema, y consecuentemente, multiplicar el grado de la avería.

Hay determinados fallos, como los denominados “fallos infantiles”, que se dan inmediatamente o al poco tiempo desde la puesta de funcionamiento. Se pueden dar por errores de diseño, mal dimensionado de los sistemas, defectos de montaje o fabricación, o por un ajuste incorrecto o difícil. Este tipo de defectos sólo se pueden evitar en las fases anteriores a la puesta en marcha de la máquina, y generalmente son difíciles de controlar. [L5, L6]

Ahora bien, desde el momento en que se pone en funcionamiento los sistemas, se va a desarrollar un desgaste en determinados elementos que puede desembocar en rotura. Para evitar el colapso total, se debe llevar a cabo el mantenimiento del mismo.

El mantenimiento es la combinación de acciones llevadas a cabo para sustituir, reparar, mantener o modificar los componentes de una instalación para que continúe operando con la disponibilidad especificada durante un periodo de tiempo.

Cabe destacar la criticidad de rodamientos en sistemas mecánicos rotativos convencionales, ya que son una de las principales causas de defectos en éstos.



Figura 1.1.- Clasificación de las estrategias de mantenimiento en función de su relación coste-beneficio y de la dificultad para su implantación. [R4]



## **2. TIPOS PRINCIPALES DE MANTENIMIENTO**

El primer tipo de mantenimiento, aunque en realidad no se le considera como tal, fue el **MANTENIMIENTO REGRESIVO**. En realidad se considera que una reparación es antieconómica, y por tanto no se plantea ninguna planificación, sino una estrategia de “usar y tirar”.

Desde un punto de vista cronológico, en los inicios de las actividades de mantenimiento industrial se comienza a practicar el **MANTENIMIENTO CORRECTIVO**, también llamado mantenimiento reactivo o de emergencia, solucionando las averías de los equipos en el momento en que se producen, reparando o sustituyendo las piezas o equipos estropeados.

Tiene dos tipos principales:

1. El mantenimiento paliativo: es un arreglo in situ, con el fin de devolver provisionalmente el estado de funcionamiento.
2. El mantenimiento curativo: es la reparación con carácter definitivo.

Estas técnicas tradicionales quedaron obsoletas, ya que implicaban altos costes: obligaba a las empresas a tener todos los elementos de la máquina duplicados, se producía una importante pérdida de tiempo de producción cada vez que había que hacer una reparación, y había un descenso de la productividad y mermas en la calidad cuando la máquina empezaba a fallar.

Seguidamente llegaría el **MANTENIMIENTO PREVENTIVO**, con inspecciones o intervenciones planificadas, donde se sustituyen las piezas a intervalos fijos, basados criterios estadísticos de la esperanza mínima de vida para las piezas sometidas a desgaste, independientemente de que éstas estén o no dañadas.

En una primera fase, el mantenimiento preventivo puede existir solo: visitas preventivas permiten vigilar el estado del material en servicio, pero sobre todo registrar informaciones que facilitarán conocer las leyes de degradación y los niveles de admisibilidad. Estas informaciones permiten anticipar fallos, y por tanto, preparar las intervenciones preventivas.

En la segunda fase, cuando se conozca el comportamiento en servicio, se evolucionará al mantenimiento sistemático, más fácil de gestionar:



- El **mantenimiento de “ronda”**, con frecuencias cortas e intervenciones preventivas. [L7]
- El **mantenimiento condicional**, que somete la material “bajo vigilancia continua”

También se puede dar el **mantenimiento sistemático o programado**, con intervenciones programadas, ya sea absoluto (sin inspecciones entre dos intervenciones programadas), o vigilado (con inspecciones periódicas). [L5]

La principal ventaja de este mantenimiento frente al correctivo es que se evitan paradas imprevistas y con ello pérdidas por paradas de producción; la principal desventaja es que en muchas ocasiones se desperdician piezas que podrían haber seguido funcionando durante más tiempo, y que pueden ocurrir averías imprevistas.

En la década de los ochenta aparece el **MANTENIMIENTO PREDICTIVO**, pero su desarrollo no llega hasta los años noventa. La industria estudia las ventajas de invertir en el desarrollo de este tipo de programas y los lleva a efecto hasta nuestros días. [L7]

Este tipo de mantenimiento predictivo o sintomático (por síntomas) es muy utilizado en la actualidad, especialmente en máquinas de funcionamiento continuo. Se basa en la vigilancia de ciertos parámetros o realización de medidas para evaluar el estado de la máquina y su evolución en el tiempo, mientras está funcionando. Estas medidas se comparan con unos patrones preestablecidos, y cuando se determina que un elemento va a fallar, se programa una parada para su sustitución; la reparación se efectuará solo cuando sea necesario. Al tener la capacidad de programar la parada, se evitan posibles pérdidas de producción.

Dentro de los síntomas que se analizan hay una gran variedad de ellos, al igual que técnicas de detección (el análisis térmico o termografía, el estudio de la composición de los lubricantes, el análisis de las vibraciones, el examen por ultrasonidos, etc.); sin embargo, **en la mayoría de las empresas el mantenimiento predictivo está centrado en el análisis de vibraciones.**

Las grandes ventajas del mantenimiento predictivo son: detectan un gran número de averías, lo hacen en su fase inicial, a menudo no es necesario parar la máquina, y permiten diagnosticar la causa de la avería.

La primera consecuencia de todo esto es que sobre todo, hay un aumento de la seguridad de las personas e instalaciones: dado que este tipo de control permite diagnosticar más temprano la evolución de la avería, se disminuyen las averías catastróficas, que podrían provocar daños en el personal de producción o en los demás sistemas de la instalación.



Además, desde el punto de vista económico, se disminuyen los costes de producción en conjunto: se reduce la duración real de las reparaciones, se aumenta el tiempo medio entre paradas por reparación, se evitan los retrasos de fabricación y se eliminan las pérdidas de producción por averías imprevistas y los cambios innecesarios.

Por último, este tipo de mantenimiento también mejora la calidad en la recepción de equipos nuevos o reparados por terceros, puesto que las técnicas usadas permiten diagnosticar el verdadero estado o condición en la que la máquina se encuentra.

El mantenimiento predictivo no sustituye a otros métodos de mantenimiento tradicionales (correctivo, preventivo), sino que es un valioso complemento. Sin embargo, esta progresión aún no ha terminado, de manera que se está asistiendo a una mutación hacia nuevos tipos de mantenimiento como el mantenimiento proactivo o el mantenimiento total de la producción. [L5]

El **MANTENIMIENTO PROACTIVO**, que se basa en la utilización de varias tecnologías para acumular datos suficientes para la evaluación global que permita aumentar la vida de la máquina al máximo, y eventualmente eliminar el mantenimiento reactivo. La parte principal de un programa pro-activo es identificar y corregir las causas raíz de la fallas en las máquinas, y prevenir y predecir aquellos puntos cuyas medidas están asociadas a inseguridades para el proceso o los individuos. Una de las principales peculiaridades de una estrategia de mantenimiento pro-activo es que las técnicas utilizadas son una extensión natural de aquéllas utilizadas en un programa de mantenimiento predictivo. Se puede destacar la evolución simultánea de la metodología y de los medios utilizados.

### **EL MANTENIMIENTO TOTAL DE LA PRODUCCIÓN (TPM)**

Desde hace unos años, existen tres movimientos que han contribuido fuertemente al aumento de la productividad en las industrias occidentales:

- TQC: Control Total de la Calidad, que asegura la calidad del producto y se extiende hasta los plazos y los costes.
- TPS: Sistema Total de la Producción, abanderado por TOYOTA a través del JAT (Justo a Tiempo), que integra de manera total los procesos de producción desde su implantación hasta la salida y distribución del producto fabricado. Se basa en reducir el stock y exigir a los proveedores plazos de entrega de entrega en pequeños lotes (disminuir inmovilizados, reducción de las desviaciones de la previsión y mayor flexibilidad ante cambios en la demanda)



- TPM: Mantenimiento Total de la Producción, el cual aparece en principio como una nueva filosofía de “Mantenimiento”, integrándolo en la Producción de manera global, no como un fin en sí mismo, sino como un medio de reducción de los costes de producción, siendo el objetivo esencial conseguir la máxima eficacia del binomio hombre-sistema de producción.

El nexo de todas es su enfoque hacia LA MEJORA. Esto ha permitido a las compañías más avanzadas a extender en sus organizaciones una forma de pensamiento “orientada a los procesos y al cliente”, para desarrollar estrategias que “aseguren la mejora continua”, involucrando a todos los niveles y funciones de la organización. [L10, L11]

Vamos a centrarnos en este último aspecto:

El **MANTENIMIENTO PRODUCTIVO TOTAL**, o también denominado sistema TPM (Total Productive Maintenance), que considera la empresa como un todo, integrando producción y mantenimiento, y persigue eliminar totalmente las pérdidas de producción, los accidentes y las averías.

Implementado originalmente en Japón en la década de los 70, y que se desarrolló junto con el concepto de “Just in Time”, es una práctica muy extendida actualmente, y el principal avance que se ha llevado a cabo en el mantenimiento es que ya no se ve como un gasto, sino como un medio de reducción de costes de producción.

Sus pilares fundamentales son: el mantenimiento autónomo (involucrar a los operarios del equipo de producción en el mantenimiento e identificación de oportunidades de mejora), la mejora de rendimiento del equipo (utilización óptima del equipo, eliminando las pérdidas), la calidad en el mantenimiento (uso de técnicas de gestión de calidad y resolución de problemas para mejor de mantenimiento), la prevención del mantenimiento (en la fase preparatoria del equipo y diseño) y la formación y entrenamiento (conocimiento de la máquina, los procesos, técnicas y resolución de problemas)

El principal objetivo del TQM es lograr, con el mínimo coste, el mayor tiempo en servicio de las instalaciones y maquinaria productivas, con el fin de conseguir la máxima “DISPONIBILIDAD”, aportando la mayor “PRODUCTIVIDAD” y “calidad del producto” y la máxima “seguridad de funcionamiento”. [L10, L11]

Todo esto se puede resumir en la filosofía de los 5 ceros: cero averías, cero paradas, cero defectos, cero accidentes, cero stocks.



Por último, otro de los pilares fundamentales es el aprovechamiento de los nuevos avances para la mejora continua: uso de nuevas tecnologías, desarrollo de la informática Industrial, aplicación de nuevos materiales.

### **3. OTROS CONCEPTOS Y TIPOS DE MANTENIMIENTO**

Otros tipos de mantenimiento desarrollados a lo largo de los últimos años han sido:

El **MANTENIMIENTO PROGRAMADO**, que se caracteriza porque los trabajos de mantenimiento se programan de acuerdo con la producción.

El **MANTENIMIENTO AUTÓNOMO**, donde los propios operarios de la máquina están entrenados para realizar trabajos de mantenimiento sencillos (engrase, limpieza, sustitución de componentes...).

El **MANTENIMIENTO ASISTIDO POR ORDENADOR**, que se caracteriza por la informatización de los trabajos de mantenimiento.

El problema de los costes de mantenimiento, la evolución de las técnicas de mantenimiento, y el desarrollo de la automatización han llevado al uso de la informática en las tareas de mantenimiento.

Las grandes ventajas que trae son la ayuda de los diagnósticos por sistemas informatizados, que permite al ordenador determinar directamente los servicios de mantenimiento necesarios a partir del estudio de la información de los captadores, e incluso generar pedidos de materiales necesarios, y gestión óptima del stock de las piezas necesarias (GMAO, gestión del mantenimiento asistido por ordenador). [L8]

### **4. ESTADO DEL MANTENIMIENTO EN 1995**

En 1995, el mantenimiento sirve para reducir la incidencia negativa de dichos fallos, ya sea disminuyendo su número, o atenuando sus consecuencias. Principalmente se usa el mantenimiento correctivo y preventivo (ya sea sin inspección previa de los equipos, o basado en los resultado de una inspección previa) [C1]

Respecto al mantenimiento predictivo o basado en condiciones, aunque comienza a ser aplicado por la industria a principios de la década de los ochenta (aparición de los primeros equipos portátiles tipo “colector de datos” con memoria interna para la medición periódica en planta, y con interfaces de conexión a los primeros PC

disponibles), hasta muy entrados los años noventa no comienza a jugar un papel importante dentro de la industria. Las direcciones, comienzan a identificar la ventaja y necesidad de invertir en el desarrollo de un programa de mantenimiento predictivo. [L8]

## 5. ESTADO ACTUAL DEL MANTENIMIENTO

En las últimas décadas, el mantenimiento tradicional, una vez estudiado y optimizado, entra en una situación de estancamiento, ante lo que se ve necesario un cambio de rumbo en los métodos de mantenimiento, y hay fuentes que incluso hablan de una nueva generación de gestión del mantenimiento.

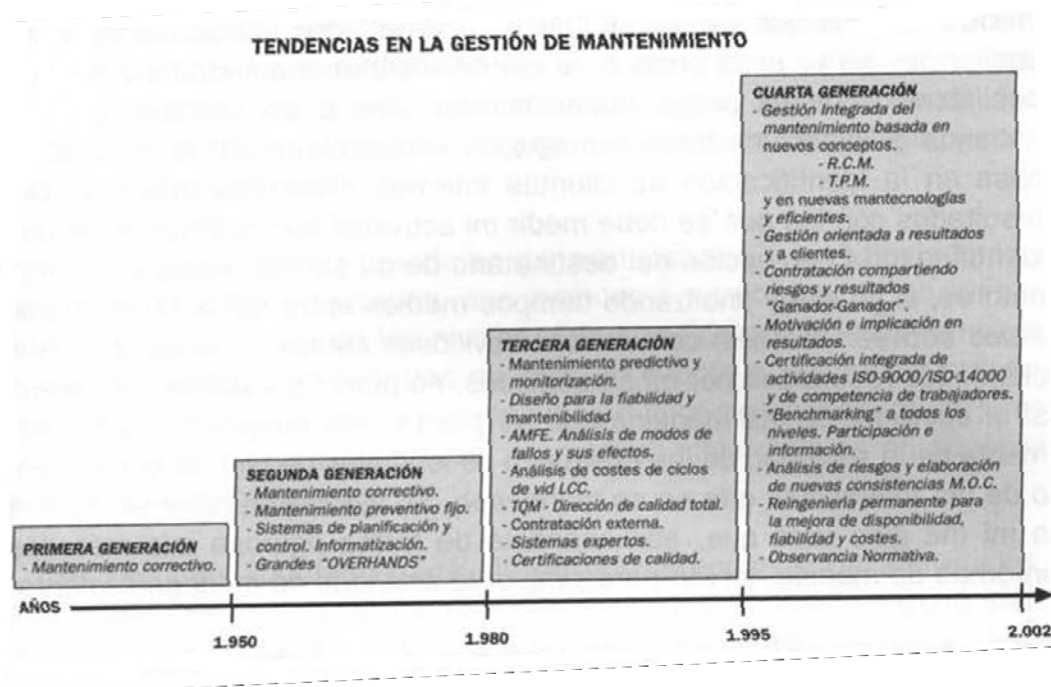


Figura 1.2.- Tendencias en la gestión de mantenimiento. [L9]

En primer lugar surge la necesidad de integrar nuevos conceptos de mantenimiento que se han desarrollado de forma aislada en los últimos decenios. Así pues, los nuevos conceptos de RCM o TPM no se van a aplicar como "filosofías salvadoras", sino que son tecnologías organizativas que pueden ser válidas para un determinado aspecto del mantenimiento, y se deben implantar de manera conjunta con diversas técnicas.

Otro enfoque que toma fuerza en estos años es la gestión de mantenimiento no orientada a resultados técnicos, sino a los clientes. Esto implica en que la sustitución de los elementos es necesaria, no ya en el momento en que me lo indiquen mis parámetros, sino en el momento en que el problema repercute en la calidad del producto final, o no se mantengan las tolerancias.





También es un aspecto diferenciador la externalización o contratación externa de empresas especializadas en mantenimiento. El aspecto que más nos importará, por encima de la mejora de costes, será la mejora del mantenimiento, al ser llevado a cabo por especialistas en el servicio prestado, y una mejor actuación ante emergencias o averías críticas. Esto implicará, además, el establecimiento de ratios medibles, mayor motivación e implicación en la actividad, y mejora de la interrelación de los grupos humanos que realizan el mantenimiento. [R3]

Otro aspecto a tener en cuenta es la “reingeniería”, no sólo de procesos, sino de la técnica de las máquinas. Además del correcto dimensionado de las máquinas y los elementos que la componen, principios como la “alineación” o el “equilibrado” de las máquinas se van a tener muy en cuenta en estos momentos. Una buena alineación o equilibrado va a suponer una disminución de las vibraciones, y por tanto, además de un ahorro de gastos operativos de la máquina (menores pérdidas, menor energía necesaria), supondrá un avance en el mantenimiento de la máquina, puesto que al eliminar vibraciones innecesarias, la durabilidad de determinados componentes será superior.

Además, el mantenimiento no será ya una actividad interna de la empresa, sino que se van a tener en cuenta el entorno industrial, con el desarrollo del “Benchmarking” (comparación con las mejores empresas del sector), y con la observancia normativa que se lleva a cabo: las aisladas certificaciones de calidad y medio ambiente ya no tendrán un tratamiento individual, sino que se tiende a alcanzar certificaciones integradas en todos los aspectos. Por tanto, las administraciones seguirán elaborando y redactando normas para cubrir el máximo número de aspectos legales; sobre todo aquellos que afecten a la seguridad y medio ambiente.

Algunas de estas normas que deben ser tenidas en cuenta son:

- ISO 14001:2004 Sistemas de gestión medioambiental – Requisitos con orientación para su uso [L9]
- ISO 55000: Estándar de Gestión integral de Activos [W1, W2]
- RD 1215/1997 Disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo. [L9]
- UNE 20654: Guía de la mantenibilidad de equipos [L9, W3]
- EN 60706: Mantenibilidad de equipos [W3]





Por último, cabe destacar el desarrollo de sistemas informáticos aplicados directa o indirectamente al mantenimiento, e implantado en más de un 90% de las empresas. Esta cifra arroja una esperanzadora cifra sobre la tendencia a reducir los mantenimientos preventivos rutinarios y sustituirlos por mantenimientos predictivos.

### EL MANTENIMIENTO EN ESPAÑA

Por último, nos parece interesante reflejar las conclusiones que aparecen en los resultados de la encuesta realizada en 2010 en diferentes sectores de producción o servicios, y que dan una idea del estado actual del mantenimiento en España: [R1]

- Los resultados marcan una tendencia de la Empresa a modernizar sus instalaciones productivas, y a ser más sensibles a la protección del medio Ambiente; sin embargo, también se indica que en la actualidad hay un notable estancamiento o una muy ligera - insuficiente- mejora en los Sistemas Organizativos, y del Control del Mantenimiento.
- Un 20% de las Empresas tiene aún una baja organización del Mantenimiento; un 50% están en una situación intermedia no satisfactoria que va mejorando muy lentamente; y que sólo el 30% dispone de un Sistema Organizativo y de Control de Mantenimiento capaz de garantizar un buen Mantenimiento.
- El 86% de los servicios de mantenimiento hacen un seguimiento sistemático a través de algunos índices, utilizándose una media de 3 de ellos (como Disponibilidad de la instalación, 55%; Frecuencia de averías, 43%; Horas de paro por averías por horas de marcha, 41%)

El último aspecto que podemos destacar es que “existe una falta de vinculación entre los objetivos del mantenimiento general y la estrategia empresarial adoptada, debido a la medición del rendimiento de los sistemas” (Bivona y Montemaggiore, 2005) [R2]. Esto se refleja en que hay discrepancia entre lo que valora las Direcciones y los responsables del Mantenimiento: los primeros ponen el mayor énfasis en los costes; y los segundos lo hacen en la calidad; sólo hay acuerdo en asegurar la disponibilidad.





## **TEMA 2:**

### **EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO Y LA TÉCNICA DEL ANÁLISIS DE VIBRACIONES**





### 1. EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO

Como hemos comentado en el capítulo anterior, en este trabajo nos vamos a centrar en el mantenimiento preventivo.

Una vez determinada la factibilidad y conveniencia de realizar un mantenimiento predictivo a una máquina o línea, el paso siguiente es determinar las variables físicas a controlar que sean indicativas de la condición de la máquina. Una vez elegida, se establecerá una perspectiva histórica de la relación entre la variable seleccionada y la vida del componente mediante la toma de lecturas de la variable en intervalos periódicos hasta que el componente se rompa o se averíe.

Los indicadores básicos para detectar la existencia de un problema en un elemento mecánico son: [L1]

- Medidas de temperatura (incrementos de temperatura desmesurados indican disipación de energía por mal funcionamiento)
- Medidas de ruido (la emisión de ondas sonoras indica disipación de energía en las superficies de contorno de la máquina).
- Medida de la composición de los aceites de lubricación.
- **Medidas de la señal de vibración (en la que centramos este trabajo, y que desarrollaremos en el siguiente punto)."**

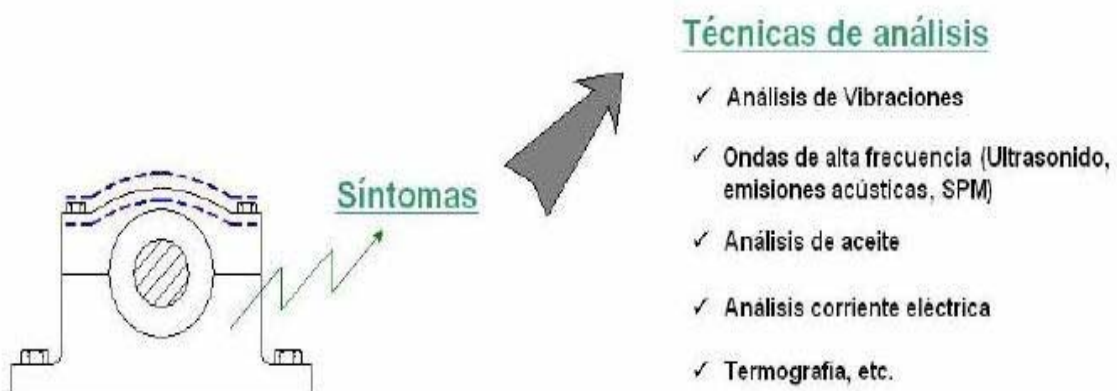


Figura 2.1.- Principales técnicas de análisis utilizadas en el mantenimiento predictivo.

Por tanto, las distintas técnicas que se pueden usar son:

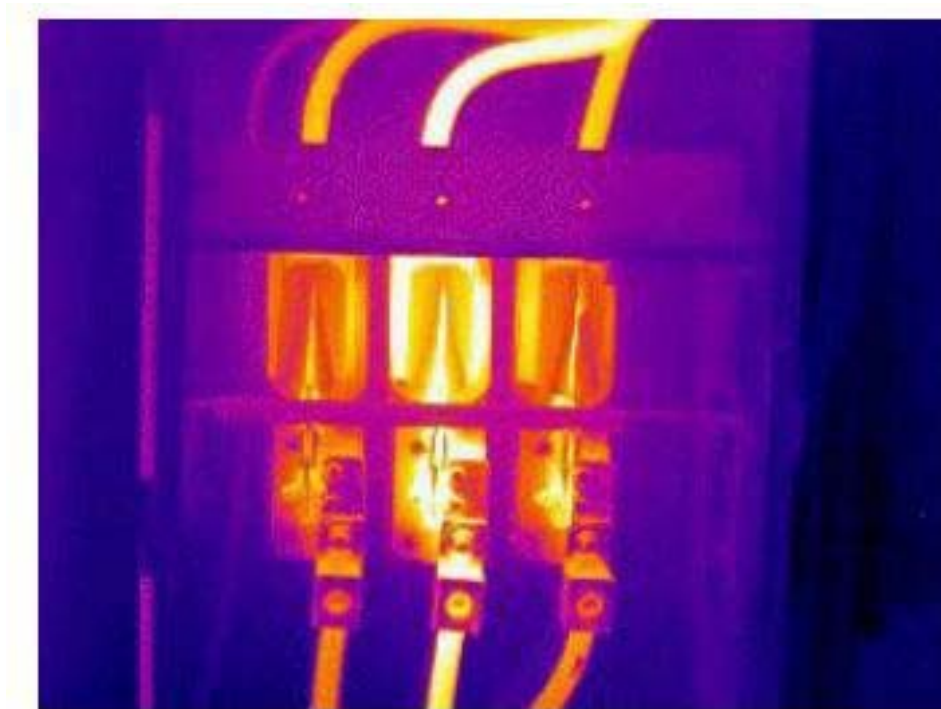


### 1. Termografía infrarroja (medida de temperatura)

El seguimiento de la temperatura, ya sea en el alojamiento del rodamiento o la temperatura del lubricante, es uno de los métodos más simples que existe para la detección de anomalías en una máquina rotatoria.

La gran mayoría de los problemas y averías en el entorno industrial, ya sea de tipo mecánico, eléctrico y de fabricación, están precedidos habitualmente por un aumento de temperatura que puede ser detectado mediante la monitorización de temperatura con un sistema de Termografía por Infrarrojos.

Los ojos humanos no son sensibles a la radiación infrarroja emitida por un objeto, pero las cámaras termográficas son capaces de medir la energía con sensores infrarrojos, capacitados para "ver" en estas longitudes de onda. Esto nos permite medir la energía radiante emitida por los objetos y, por consiguiente determinar la temperatura de la superficie con precisión, en tiempo real y sin contacto. [C2]



**Figura 2.2.- Análisis termográfico de un interruptor. [C2]**

Es un método muy empleado en equipos eléctricos, aunque conviene complementarse con otras técnicas como las indicadas en este capítulo.



## 2. Análisis por ultrasonidos (medida de ruido)

La presencia de defectos localizados o distribuidos aumenta el ruido y las vibraciones generadas por el sistema mecánico dañado. La detección de anomalías es posible mediante el análisis de la señal acústica siempre que la presión acústica (la intensidad del sonido) sea lo suficiente elevada. El análisis por ultrasonidos estudia las ondas de sonido de alta frecuencia producidas por los equipos que no son perceptibles por el oído humano.

Casi todos estos problemas producen ultrasonido en un rango aproximado a los 40 KHz. Estas son frecuencias con características muy aprovechables en el mantenimiento predictivo, puesto que las ondas sonoras son de corta longitud atenuándose rápidamente sin producir rebotes. Además, la alta direccionalidad del ultrasonido permite localizar con rapidez y precisión la ubicación del defecto.

Se usan sobre todo para detectar: fricciones en máquinas rotativas, fallas y/o fugas en válvulas, fugas de fluidos, detección de "arco eléctrico", verificación de la integridad de juntas de recintos estancos o pérdidas de vacío.



Figura 2.3.- Análisis por ultrasonidos. [C2]

La aplicación del análisis por ultrasonido se hace indispensable especialmente en la detección de defectos existentes en equipos rotatorios que giran a velocidades inferiores a las 300 RPM, donde la técnica de medición de vibraciones se transforma en un procedimiento ineficiente.



### 3. Análisis de lubricantes

El estado del lubricante mediante análisis de **las partículas sólidas** mezcladas con el lubricante, ya sean generadas o adquiridas durante el funcionamiento de la máquina, resulta ser otro indicador del estado de la máquina. La presencia de partículas en el lubricante puede detectarse automáticamente con los sensores adecuados. Además, el estado de la composición, la forma o el tamaño de las diferentes partículas pueden, en determinadas ocasiones, facilitar la localización del fallo.

Dependiendo de la necesidad, los análisis pueden ser:

1. **Análisis Iniciales:** Se realizan a productos de aquellos equipos que presenten dudas provenientes de los resultados del Estudio de Lubricación y permiten correcciones en la selección del producto, motivadas por cambios en condiciones de operación.
2. **Análisis Rutinarios:** Se aplican para equipos considerados como críticos o de gran capacidad, en los cuales se define una frecuencia de muestreo, siendo el objetivo principal de los análisis la determinación del estado del aceite, nivel de desgaste y contaminación entre otros.
3. **Análisis de Emergencia:** se efectúan para detectar cualquier anomalía en el equipo y/o lubricante, como: contaminación con agua, presencia de partículas sólidas (filtros y sellos defectuosos), uso de un producto inadecuado.

La ilustración muestra un análisis microscópico de lubricantes sintéticos para la detección de partículas sólidas metálicas.

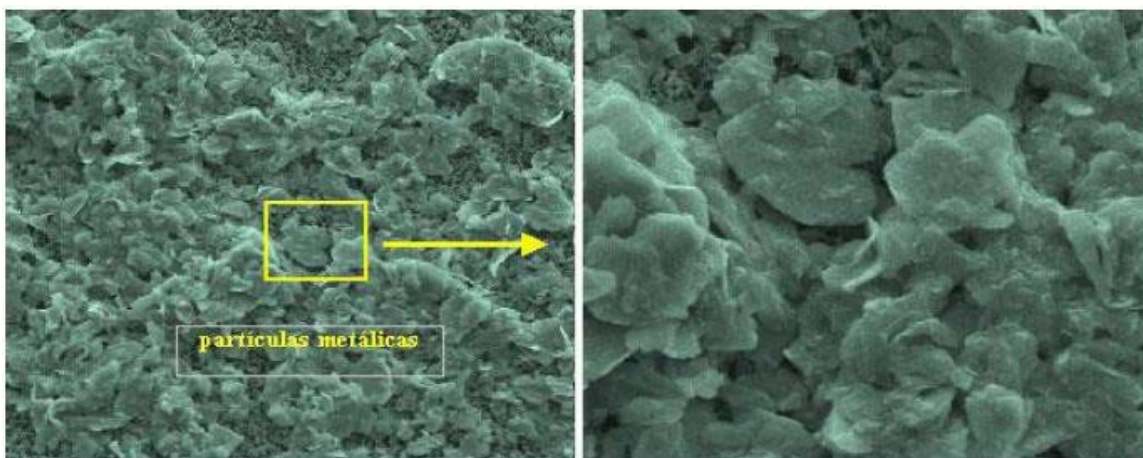


Figura 2.4.- Análisis de aceites. Presencia de partículas sólidas. [C2]





#### 4. Análisis de eléctrico

El objeto del análisis eléctrico es realizar estudios eléctricos sobre aquellos equipos que pueden presentar averías de origen electro-mecánico.

El análisis de posibles cambios en las corrientes eléctricas de un motor eléctrico puede desempeñarse a modo de control de calidad para detectar defectos, como herramienta de tendencia o como emisor de un diagnóstico inmediato del estado del mismo.



Figura 2.5.- Estudio de análisis eléctrico. [C2]

En función de la corriente de alimentación, trifásica o continua, del equipo (generalmente motores eléctricos) que se desea analizar, se pueden verificar las siguientes condiciones: estado del circuito, aislamiento, estator, rotor, excentricidades en el entrehierro.

## 2. EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Debido a que la mayor parte de los equipos de la industria son mecánicos y rotativos, la medición de vibraciones es normalmente la técnica clave en la mayor parte de los programas de mantenimiento. La importancia de la utilización de este tipo de técnicas deriva del hecho de existir relaciones causa-efecto entre las vibraciones medidas y las averías de las máquinas rotativas. Según estudios efectuados, cerca del 90% de las averías de las máquinas rotativas fueron precedidas de un aumento significativo de sus niveles de vibración.

Una máquina ideal sería aquella que no produjera vibraciones, pero es imposible de construir. Por tanto, cada máquina posee en sus condiciones normales de funcionamiento una curva vibratoria característica, que se puede tomar como gráfico de referencia. Estas vibraciones pueden ser medidas en alguna superficie exterior de la máquina y tomarse como indicador del estado de la máquina. Además, esa información puede usarse para mejorar el aislamiento y reducir las vibraciones de la maquinaria.

La curva en forma de “bañera” de la figura muestra la evolución típica de las vibraciones durante el ciclo de funcionamiento de una máquina. [L1]

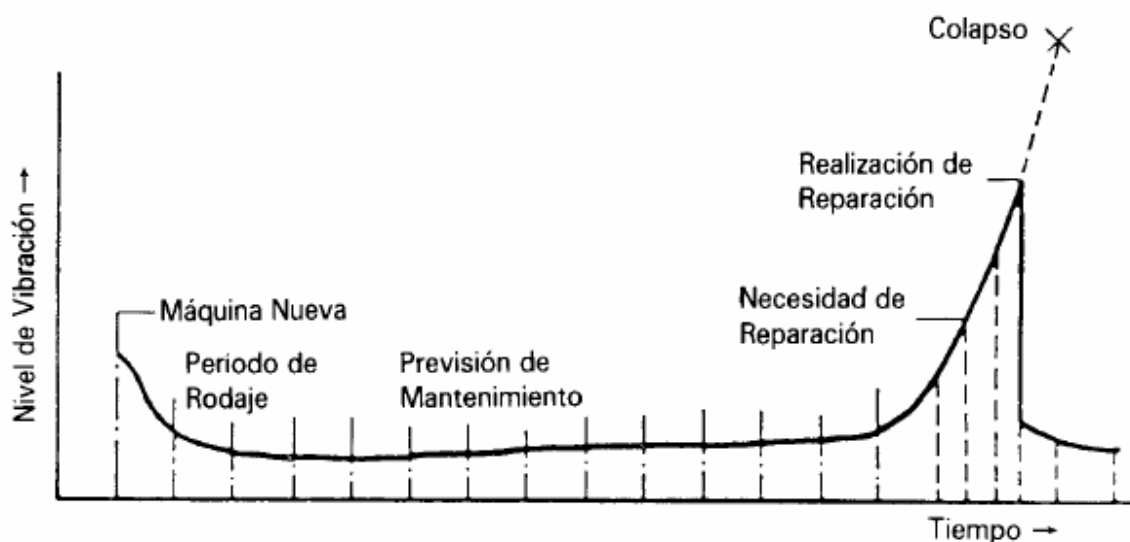


Figura 2.6.- Evolución del nivel de vibración en una máquina. [L1]

Cuando una avería comienza a desarrollarse, el comportamiento dinámico de la máquina se altera y consecuentemente también se altera su curva vibratoria; el deterioro se caracteriza casi siempre por un aumento de las vibraciones. Estas vibraciones, que pueden estar generadas por la interacción de los componentes de la máquina, la existencia de



holguras y defectos, y la introducción de partículas extrañas, además de disipar energía, pueden producir daños por fatiga de los materiales, y tener efectos negativos en las personas que las manejan o en el entorno laboral (generación de ruidos). Estas son las vibraciones a analizar.

En las máquinas antiguas o lentas, era suficiente con el oído o el tacto del operario o sencillos instrumentos para detectar la variación de las señales vibratorias. Actualmente, es necesario disponer de equipos avanzados y modernos métodos de análisis que midan y analicen las señales de vibración, capaces de adaptarse a las condiciones dinámicas y velocidades a las que la máquina desarrolla su trabajo.

Los espectros obtenidos posteriormente se compararán con el de referencia y gracias al análisis en frecuencia de las vibraciones se podrá detectar la necesidad de actuar y la causa de la perturbación: cada problema que se presenta en una máquina, por deterioro de un elemento determinado, va asociado a una componente en frecuencia. Puede demostrarse que existen curvas vibratorias típicas para cada tipo de avería.

El análisis espectral de las señales vibratorias es uno de los métodos más utilizados en la detección de defectos, y una de las técnicas más empleadas para el estudio y comprensión de las vibraciones es el análisis en el dominio de la frecuencia. Nos servirá para identificar las amplitudes predominantes de las vibraciones detectadas en el elemento o máquina, la determinación de las causas de la vibración y la corrección del problema que ellas representan. Además, nos informarán de posibles problemas de alineación o equilibrado que hagan que la máquina no funcione de manera óptima en cuanto al consumo de recursos operativos. [R5]



### **3. ESTADO DE LA TÉCNICA DEL ANÁLISIS DE VIBRACIONES**

Aquí se presentan algunos de los hitos más relevantes en el estudio de la técnica del análisis de vibraciones, ordenados cronológicamente:

**1961:** GUSTAFSSON y TALLIAN, proponen un método de detección de defectos en rodamientos basado en el número de picos de impactos que superan un determinado umbral o nivel prefijado, en el dominio temporal.

**1963:** BOGERT desarrolla la técnica del análisis Cepstral para el análisis sísmico.

**1965:** COOLEY y TUKEY publican el algoritmo de la transformada rápida de Fourier o FFT. Este algoritmo permitió, mediante la reducción del tiempo de cálculo, el rápido desarrollo de nuevos analizadores de frecuencia para el control de vibraciones, provocando que las técnicas de análisis de vibraciones tuvieran una rápida evolución, paralela a la de la electrónica, y con ello el mantenimiento predictivo.

En la **década de los 70** se desarrollaron importantes técnicas de tratamiento y análisis de la señal de vibración y se aplicaron otras que venían siendo usadas en otros campos de la técnica, como el Cepstrum, el promediado temporal (BRAUN, en 1975) y otras.

**1970:** Basándose en la geometría de los rodamientos, MARTIN calcula las frecuencias rotacionales de defecto.

**1972:** BRODERICK señala las grandes dificultades en detectar picos significativos a las frecuencias rotacionales de defectos en rodamientos dentro del espectro, aspecto que no está muy desarrollado en la literatura, si bien es confirmado más adelante por otros investigadores, tales como OSUAGWU y THOMAS, en 1982 y HIGBIE, en 1989.

**1973:** RANDALL, de Bruel & Kjaer, comienza a aplicar la técnica del Cepstrum en la detección de defectos en engranajes, y realiza uno de los primeros y escasos estudios sobre las frecuencias esperadas en este tipo de mecanismos.

**1975:** BRAUN publica un artículo sobre la técnica del promediado temporal.

**1978:** NISBET y MULLET presentan la forma de fallo en rodamientos y las causas y síntomas que presenta cada uno de estos fallos.

**1979:** MARK publica un trabajo teórico muy completo, sobre los modelos matemáticos que definen las excitaciones de vibración, producidas por desviaciones en las curvas, (evolventes), que conforman el perfil del diente.



**1979:** TAYLOR profundiza en la diagnosis de defectos de engranajes en el dominio espectral, analizando los defectos desde las frecuencias de resonancia de ruedas, con ayuda de la técnica de demodulación y dando los primeros pasos en el dominio temporal, a través del análisis de las frecuencias de resonancia de ruedas, ejes, etc. Si bien el número de defectos analizados y la profundidad del análisis realizado fueron bastante escasos, se demostró, sin embargo, la gran complejidad del modelo espectral de los engranajes y la relativa validez de las frecuencias de resonancia como fuente de información válida para la diagnosis de defectos.

**1980:** BRAUN desarrolla los modelos matemáticos de defectos en rodamientos, basados en la modulación producida por dichos defectos sobre la frecuencia de resonancia de los elementos que componen el rodamiento (pistas, rodillos, bolas, etc.).

**1981:** BOYES avanza un poco más en las frecuencias esperadas en trenes de engranajes, y desarrolla la técnica “zoom”.

**1982:** OSUAGWU y THOMAS demostrarán que la técnica del Cepstrum a menudo resulta efectiva para la detección de defectos en rodamientos. Además explicarán teóricamente las causas de la ocultación de dichas frecuencias, por efecto del promediado y del desplazamiento producido por una variación del periodo de impacto y de la intermodulación.

**1982:** BOYES, DARLOW y D’AMATO, mediante la técnica de demodulación realizan un análisis práctico de las frecuencias de resonancia para la detección de defectos en rodamientos, con algunos resultados más esperanzadores que los obtenidos en el caso de los engranajes. Esta técnica será revisada en 1984 por McFADDEN y SMITH, estableciendo un modelo vibratorio donde se tiene en cuenta la distribución de carga en el rodamiento y la presencia de un defecto localizado.

**1984:** DE JONG y MANNING desarrollan el modelo teórico de señal temporal, correspondiente a la frecuencia de engrane de un tren de engranajes en óptimas condiciones.

**1987:** BOASHASH escribe un interesante artículo sobre la aplicación de las distribuciones de Wigner-Ville al análisis de las señales no estacionarias.

**1987:** BRUEL&KJAER, en sus notas de aplicación analiza con cierta profundidad las diferentes técnicas de detección y diagnosis de defectos en rodamientos, desde las más sencillas y antiguas (RMS global, Factor de cresta, etc.) hasta las más complejas y modernas (Zoom, Cepstrum, demodulaciones, etc.).



**1987:** SZROM publica varios trabajos relacionados con la diagnosis de algunos defectos en reductores a través del análisis de las vibraciones, pero debido al número de defectos analizados y la corta extensión del análisis condujeron a resultados poco clarificadores.

**1989:** LAI y H.YI. insisten un poco más en el análisis de las frecuencias de resonancia para la detección de defectos, desarrollando algunas fórmulas matemáticas que calculan dichas frecuencias en el caso de los rodamientos.

FORRESTER aplica las distribuciones de Wigner-Ville a la diagnosis de daños en las cajas de engranajes de helicópteros en el dominio tiempo-frecuencia.

**1990:** LEDUCQ usa la Transformada Wavelet (WT) para diagnosticar el estado una bomba centrífuga, a través del análisis del ruido hidráulico que producía. Aunque a finales de la década de los 80 hay autores que comienzan a publicar trabajos sobre las bondades de la aplicación de la transformada “wavelet” en el tratamiento y análisis de la señal, éste fue probablemente el primer trabajo acerca del uso de la Wavelet para el diagnóstico de defectos.

**1991:** BERRY publica los resultados de sus investigaciones sobre la diagnosis de defectos en rodamientos, en los que incluye los modelos de espectros de cuatro estados diferentes de la evolución de dichos defectos.

**1991:** ZENG y WANG hacen una aproximación a la utilización de la lógica Fuzzy.

**1991:** GARCÍA PRADA, en su tesis doctoral, aplica diversas técnicas estadísticas multivariable a los espectros de potencia de vibración (Análisis Discriminante) para clasificar el estado de una máquina, llegando a confeccionar un mapa de clasificación.

**1994:** HOWARD usa distintas ecuaciones para calcular las frecuencias características de cada defecto.

**1994:** NEWLAND introdujo la Transformada Wavelet en el campo de la ingeniería, con varios métodos de cálculo y ejemplos de su aplicación en el análisis de señales vibratorias. Además, propuso una función Wavelet Harmónica e identificó con éxito picos y fases de señales transitorias. Gracias a este trabajo se logra la total aceptación y popularización de las Wavelets.

**1995:** RODA VÁZQUEZ, en su tesis doctoral, realiza un estudio muy interesante sobre las técnicas a emplear en el análisis de defectos de reductores, abarcando problemas en engranajes y rodamientos, y donde ofrece un amplio catálogo de los diferentes defectos que se pueden presentar en las cajas de engranajes y las técnicas más eficaces para



diagnosticar cada defecto. Complementa el estudio con ejemplos en sistemas industriales y en bancada.

**1995:** MARTIN introduce parámetros estadísticos como sesgo y kurtosis para analizar la señal vibratoria.

**1995:** McFADDEN, WANG y LIN usaron la Transformada Wavelet, de una manera muy general, para la detección de fallos en cajas de engranajes. Sus resultados revelaron que la Wavelet es capaz de detectar tanto fallos mecánicos incipientes como diferentes tipos de defectos simultáneamente.

**1996:** MORI aplica la transformada Wavelet para predecir el fallo de “spalling” en rodamientos.

**1996:** LOGAN y MATHEW usan la dimensión de la correlación para diagnosticar fallos en los rodamientos.

**1997:** JAMES LI utiliza la transformada Wavelet para detectar defectos localizados.

**1997:** HONARVAR desarrolla en uso de parámetros estadísticos como sesgo y kurtosis para analizar la señal vibratoria.

**1997:** BONATO desarrolla un método para el análisis de defectos en cajas de engranajes usando representaciones temporales y frecuenciales, y STASZEWSKI diagnostica los defectos en cajas de engranajes utilizando el espectro de fase de la Transformada Wavelet.

**1997:** RODA publica un artículo sobre la detección de daños en cajas de engranajes mediante análisis de espectros selectivos de vibración, en el cual hace un estudio detallado de los defectos en una caja de engranajes y la mejor técnica de análisis a emplear para su diagnosis.

**1997:** Se empieza a estudiar nuevas herramientas de control como las redes neuronales para el cálculo del deterioro en máquinas, ya sea como única técnica (SUBRAHMANYAM), o combinadas con la transformada Wavelet (PAYA).

**1998:** WANG presenta un método que combina el promediado temporal síncrono y el análisis de la envolvente para la detección de defectos en el rodamiento.

**1998:** DANTHEZ introduce una nueva técnica de estimación espectral, basada en la transformada de Fourier, el espectro autocohérente (ACS), que permite una estimación exacta y la cancelación de tonos puros.

**1998:** MECHEFSKE y FERNÁNDEZ aplican la lógica Fuzzy a la diagnosis de fallos en máquinas rotativas.





**1998:** DRON propone el análisis del espectro paramétrico de la señal vibratoria emitida por rodamiento de bolas.

**1998:** TANDON y CHOUDHURY proponen modelos sobre defectos distribuidos y localizados.

**1998:** HAMZAOUI formula un modelo para la diagnosis de los fallos en los rodamientos a través de su emisión acústica y estableciendo la comparación con las vibraciones y lo prueba experimentalmente. En 2000, CHOUDHURY y TANDON también investigan en ese sentido.

**1999:** JIANG aplica la dimensión de la correlación a la diagnosis de cajas de engranajes.

**1999:** MORALES y QUIÑONES, y NELIAS, efectuaron interesantes estudios de modelado de lubricación (elastohidrodinámica o EHD) en rodamientos.

**1999:** TSE y ATHERTON utilizan las redes neuronales para el cálculo del deterioro de las máquinas en general. Además, en este mismo año, DELLOMO aplica las redes neuronales para una caja de engranajes de un helicóptero.

**1999:** CANADA utiliza la técnica de Peakvue para detectar defectos en los rodamientos. Posteriormente, ROBINSON, en 2001, también utilizaría esta técnica para determinar la severidad del defecto.

**1999:** LIU y LING ofrecen una selección de wavelets aplicables al diagnóstico de máquinas.

En estos últimos años han aparecido investigaciones particularizadas en la detección de fallos en engranajes aplicando la transformada wavelet: en 1999, BOULABHAL; en 2000, SUNG, y en 2003, BAYDAR y BALL.

**2000:** WISMER de Brüel & Kjær, complementa el trabajo de RANDALL y hace un estudio sobre la diagnosis de defectos en cajas de engranajes aplicando Cepstrum y otras técnicas.

**2000:** YANG aplica las redes neuronales para el cálculo del deterioro en rodamientos.

**2000:** BRIE desarrolla el modelo vibratorio causado por el “spalling” en los rodamientos.

**2001:** BARTELMUS propone un modelo matemático de vibraciones de cajas de engranajes, y FENG expone la simulación de las señales vibratorias de defectos en elementos de los rodamientos.





Durante estos últimos años, el análisis de la envolvente se ha consolidado como un método eficaz de diagnosticar defectos incipientes en rodamientos. Este hecho conduce a que muchos autores intenten verificar la validez de otras técnicas comparando sus resultados con los obtenidos al aplicar el análisis de la envolvente: en **2001**, RUBINI y MENEGHETTI presentan la comparación con el análisis de la transformada wavelet y abarcan el problema del tamaño del defecto, aunque sólo lo cualifican (defecto pequeño, medio y grande) no lo cuantifican en dimensión. RANDALL propone la relación con la correlación espectral.

**2001:** PETER diagnostica fallos en rodamientos con la transformada Wavelet junto con la envolvente.

**2001:** ALTMAN utiliza la lógica Fuzzy combinada con una transformada Wavelet para la demodulación de las señales vibratorias emitidas por rodamientos con defectos.

**2002:** BERNHARD utiliza redes neuronales combinadas con la transformada Wavelet.

**2002:** RUBIO ALONSO, en su tesis doctoral, partiendo como base del trabajo de Roda Vázquez, aplica nuevas técnicas para estudiar el estado de la máquina.

**2002:** NIKOLAOU y SUN emplean la transformada Wavelet para diagnosticar fallos en rodamientos demodulando la señal de vibración.

**2002:** GARCÍA y RUBIO publican un interesante estudio sobre la aplicación de programas que combinan modelado de elementos finitos y modelado de condiciones dinámicas.

**2003:** DEMARCHI y KANG efectúan trabajos utilizando las transformadas Wavelet.

**2004:** Van evolucionando los modelos de diagnosis que utilizan simultáneamente varias técnicas, así, LOU utiliza conjuntamente transformadas Wavelet y sistema Fuzzy para diagnosis de fallo en rodamientos.

**2005:** ZHANG hace uso de las transformadas Wavelet.

**2005:** CHENG realiza un análisis basado en la transformada Wavelet utilizando los dominios tiempo-densidad de energía.

**2006:** FAN utiliza conjuntamente la transformada de Hilbert y la transformada Wavelet Packet para detección de fallos en cajas de engranajes.

**2007:** LARA CASTRO utiliza la transformada Wavelet y las redes neuronales para la caracterización de los defectos en rodamientos.



**2007:** LIU utiliza algoritmos genéticos (G.A.) para optimizar el procedimiento de detección de fallos, donde se utiliza un sistema neural-fuzzy (N.F.) para el proceso de toma de decisiones.

**2009:** MARÍN LÓPEZ, además de la caracterización de los defectos en rodamientos a partir de la señal de vibración, realiza un estudio muy completo a partir de la temperatura, y del amortiguamiento.

**2014:** GÓMEZ GARCÍA, realiza un estudio muy interesante de la aplicación de las últimas técnicas de análisis multivariable y redes neuronales para la detección de fallos en ejes.

Debido a la gran cantidad de técnicas de análisis de las vibraciones existentes, son muchos los autores que estos últimos años se han dedicado a efectuar evoluciones o revisiones (reviews) sobre las técnicas más importantes aplicadas a la diagnosis de un determinado sistema o elemento mecánico:

- TANDON, en 1992 y después en 1999, a rodamientos.
- DALPIAZ y RIVOLA, en 1997, a máquinas automáticas.
- LEBOLD, en 2000, a cajas de engranajes.
- WANG, en 2001, a engranajes.
- JARDINE., en 2006, a diagnóstico de maquinaria.
- PATIL, en 2008, análisis de las señales como medio de diagnóstico.

Finalmente, debemos referir también la gran cantidad de normas establecidas, de las que reflejamos una muestra, tanto para la denominación de los términos o las características operativas de los rodamientos, como para el vocabulario y la evaluación de las vibraciones mecánicas:

- ISO 5593:1997 Rolling bearings - Vocabulary.
- ISO 5753:1991 Rolling bearings - Radial internal clearance.
- ISO 16799:1999 Rolling bearings - Dynamic load ratings and rating life - Discontinuities in the calculating of basic dynamic load ratings.



- ISO 12044:1995 Rolling bearings - Single-row angular contact ball bearings - Chamfer dimensions for outer ring non-thrust side.
- ISO 3290:2001 Rolling bearings - Balls - Dimensions and tolerances.
- ISO 1925:2001 Mechanical vibration - Balancing - Vocabulary.
- ISO 2041:1990 Vibration and shock - Vocabulary.
- ISO 10816-1:1995 Mechanical vibration- Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts - Part 1: General guidelines.
- ISO 10816-2:2001 Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on rotating shafts - Part 2: Land-based steam turbines and generators in excess of 50 MW with normal operating speeds of 1 500 r/min, and 3 600 r/min.
- ISO 10816-3:1998 Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts -Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15000 r/min measured in situ.
- ISO 10816-4:1998 Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts - Part 4: Gas turbine driven sets excluding aircraft derivatives.
- ISO 10816-5:2000 technical vibration- Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts - Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pumping plants.
- ISO 10816-6:1995 Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts - Part 6: Reciprocating machines with power ratings above 100 kW.
- ISO 13374-1:2003 Condition monitoring and diagnostics of machines - Data processing, communication and presentation - Part 1: General guidelines
- ISO 13380:2002 Condition monitoring and diagnostics of machines - General guidelines on using performance parameters.





# **TEMA 3:**

## **TÉCNICAS APLICABLES AL ANÁLISIS DE SEÑALES DE VIBRACIÓN EN 1995**





El análisis de vibraciones es una de las prácticas más usadas del mantenimiento predictivo y requiere un conocimiento de las señales y su análisis es uno de los pilares fundamentales de la Ingeniería. La información que contienen las señales debe transformarse dependiendo de los propósitos de estudio.

Estas técnicas se pueden aplicar en el dominio temporal, en el dominio de la frecuencia o en el dominio tiempo-frecuencia.

Los análisis más sencillos son aquéllos basados en medidas temporales. Estos sistemas emplean habitualmente medidas estadísticas efectuadas sobre las historias temporales, con el fin de establecer parámetros de tendencia que permitan de detectar la presencia de un modo de fallo. Se pueden obtener varios valores como la desviación típica y la Kurtosis de la señal, pero estas magnitudes no aportan gran información sobre las vibraciones de los rodamientos puesto que no ofrecen información alguna sobre las frecuencias que tiene la señal analizada, por este motivo es necesario realizar nuestros análisis en el dominio de la frecuencia.

Con el análisis en frecuencia se pretende describir una señal temporal en componentes de frecuencia; por tanto, no se está añadiendo ni quitando nada, sino describir en forma distinta la señal. [C3]. Las técnicas basadas en análisis realizados en frecuencia utilizan como rasgos fundamentales para fijar medidas de tendencia las amplitudes de los armónicos dominantes en la respuesta, así como los anchos de banda asociados. Sin embargo, este tipo de análisis no es capaz de detectar fallos locales ya que la transitoriedad de estos eventos en el dominio temporal queda enmascarada en el espectro obtenido al realizar la transformación en frecuencia. Por consiguiente, el seguimiento tanto de los anchos de banda como de los armónicos afectados se ve, en caso de fallos locales, seriamente dificultado.

Una alternativa para resolver este problema se encuentra en el empleo de análisis tiempo-frecuencia, los cuales ofrecen una medida de la distribución de energía de la señal en ambos dominios simultáneamente (pero con distinta resolución de acuerdo con el principio de incertidumbre) [L2].

## 1. ANÁLISIS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

El análisis de las vibraciones en el dominio de la frecuencia agrupa quizás las técnicas más potentes y por tanto las más utilizadas para la detección y diagnóstico de fallos en máquinas. [T2]

El objeto del análisis en frecuencia es descomponer una señal compleja (como las vibraciones mecánicas) en componentes más sencillos que permiten un estudio y análisis más simple. Se basa en la transformación de la señal temporal de vibración recogida de la máquina en un espectro de frecuencias que posibilita conocer la amplitud de la vibración y otras características de interés de la misma como fase, modulaciones, etc., para cada una de las frecuencias de interés, permitiendo así la posibilidad de relacionarlas con la avería o fallo de la máquina.

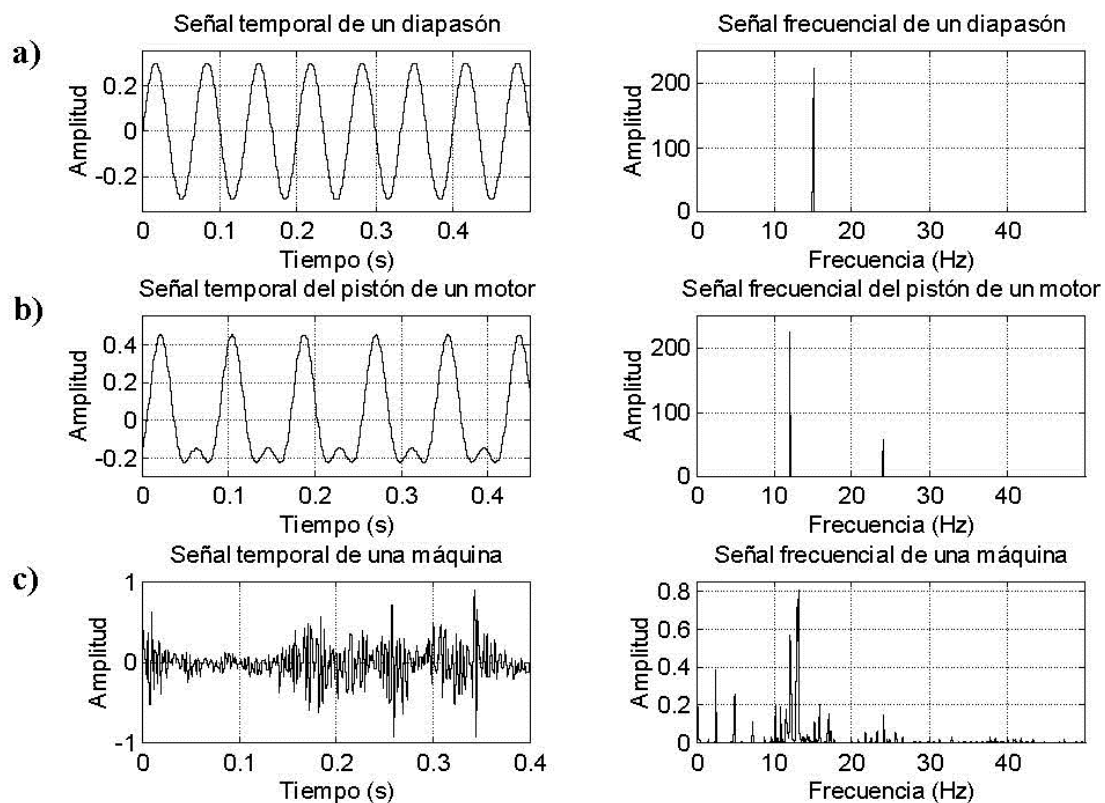


Figura 3.1.- Representación temporal y frecuencial de la vibración producida por un diapasón, el pistón de un motor y una máquina compleja. [PF1]



**1.1. ANÁLISIS POR TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT)**

“La teoría de Fourier se basa en la idea de que cualquier señal periódica puede descomponerse en una suma de senos; esta suma de senos se denomina serie de Fourier”

$$g(t) = A_0 + \sum_{n=0}^{n=\infty} A_n \cdot \text{sen}(2\pi \cdot n \cdot f_0 \cdot t) + B_n \cdot \text{cos}(2\pi \cdot n \cdot f_0 \cdot t)$$

$$G(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t) \cdot e^{-j \cdot 2\pi \cdot f \cdot t} \cdot dt$$

La transformada rápida de Fourier (FFT) es un algoritmo de computador para el cálculo de transformadas discretas de Fourier (D.F.T.) con una gran reducción del número de operaciones aritméticas comparado con la evaluación directa de la DFT (de  $N^2$  cálculos a  $N \cdot \log_2(N)$ ).

Si partimos de la DFT, definida como:

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{n=N-1} x_n \cdot e^{-j \cdot 2\pi \cdot k \cdot \frac{n}{N}} \quad k = 0, 1, 2, \dots, (N-1)$$

Podemos descomponer la sucesión completa en un cierto número de sucesiones más cortas, calculando la DFT de estas sucesiones, y combinando la FFT todas las sucesiones para obtener la DFT completa de una manera más sencilla.

Una de las mayores ventajas del FFT sobre los otros tipos de análisis de frecuencias (filtros), es que la retención de la información de fase hace posible la transformación en cualquier dirección y de forma relativamente simple. También permite la evaluación de un gran número de funciones aplicables a medidas en multicanal y análisis de sistemas (correlación, coherencia, funciones de respuesta en frecuencia, etc.)



## PROCESO FFT. DISCRETIZACIÓN

La primera etapa en un proceso digital es discretizar la señal temporal; esta discretización se puede considerar como el equivalente a una multiplicación de la señal temporal por un tren de impulsos (llamado muestreo)  $\Delta_I(t)$  con un intervalo de muestreo  $\Delta t$ . La transformada de Fourier de este tren de impulsos  $\Delta_I(f)$ , se corresponde con otro tren de impulsos a todos los múltiplos de la frecuencia de muestreo  $f_s = 1/\Delta t$ .

La siguiente etapa será limitar la señal temporal a una longitud en el tiempo (duración) adecuada, para obtener un registro temporal finito (ventana).

$$G(f) = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} g(t) \cdot e^{-j \cdot 2\pi \cdot f \cdot t} \cdot dt$$

Finalmente, como no es posible representar un espectro continuo, es necesario discretizarlo de forma similar a la realizada con la función temporal, pero a la inversa; es decir, ahora hay que multiplicar el espectro de la señal temporal ventaneada por el tren de impulsos o muestras  $\Delta_2(f)$ , separados por un intervalo  $\Delta f$ , cuya transformación al dominio temporal es otro tren de impulsos separados un periodo  $T = 1/\Delta f$ .

De todo lo expuesto, se deduce que el análisis a través del FFT opera con todos los valores de la señal temporal simultáneamente, a diferencia del análisis por filtrado.

## ERRORES DE LA FFT

Como consecuencia de este proceso, se pueden introducir determinados errores en el proceso que implican limitaciones del mismo. Los citados errores que se verán son: [P1]

- Error debido al “aliasing” o efecto de solapamiento y que consiste en una superposición de la señal.
- Error debido al “leakage”. Este error se origina en las oscilaciones que se producen alrededor del origen al aplicar la FFT a una función escalón. Este error está relacionado con la ventana temporal empleada.
- Error debido al efecto Picket Fence o efecto empalizada. Se origina al aplicar la FFT, ya que para formar el espectro continuo, unas líneas del espectro resultan visibles pero otras resultan opacas.

### - Efecto de solapamiento (Aliasing)

Aliasing consiste en el enmascaramiento de la señal real por otra señal de más baja frecuencia. Es un problema de gran importancia en la ejecución del proceso FFT.

La representación de la DFT es la siguiente:

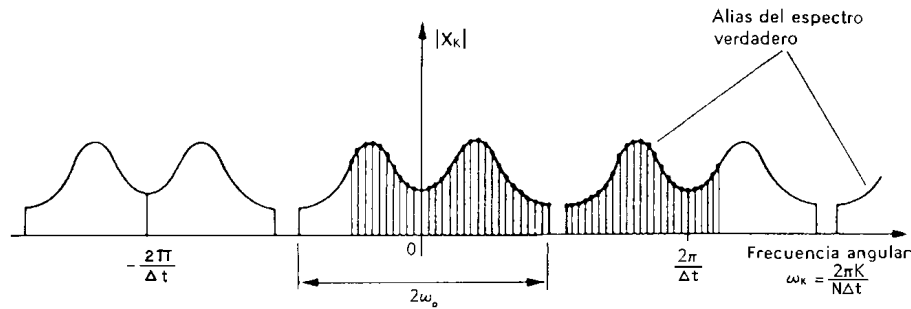


Figura 3.2.- Representación gráfica de la DFT de una de una serie finita. [PF1]

Si en la señal original existen frecuencias superiores a  $\pi / \Delta t$ , dichas frecuencias introducirán una distorsión denominada “aliasing” o “solapamiento”:

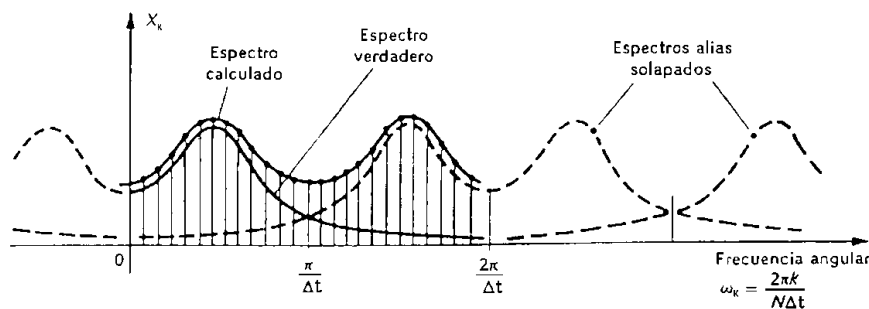


Figura 3.3.- Representación gráfica del error producido por solapamiento o “aliasing” al aplicar la DFT a una señal. [PF1]

La frecuencia de Nyquist es la máxima frecuencia que se puede detectar partiendo de datos que hayan sido muestreados con un espaciamiento de  $\Delta t$  segundos, o lo que es igual, con una frecuencia de muestreo de:

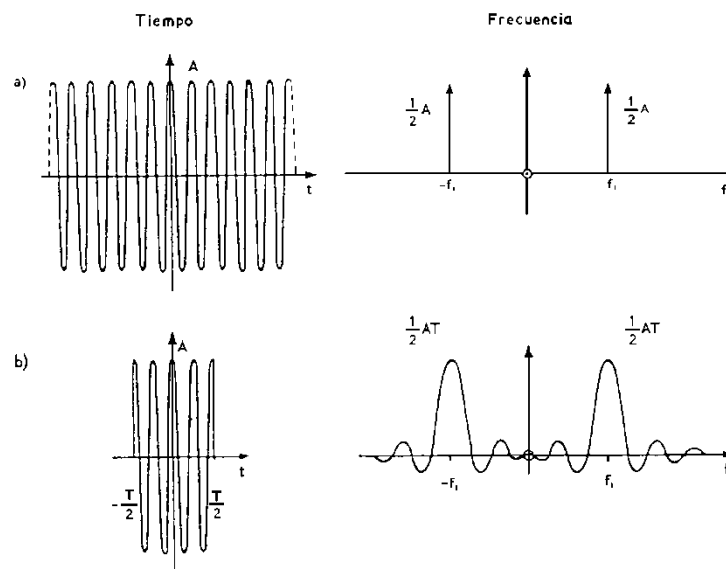
$$f_N = \frac{1}{2 \cdot \Delta t} \quad (Hz)$$

Normalmente, los analizadores llevan incorporados un filtro “antialiasing” apropiado para cada rango de frecuencias; se suele tratar de un filtro de paso bajo con una frecuencia de corte de aproximadamente el 80% de la frecuencia de Nyquist, que se encargan de eliminar las frecuencias que producen el “aliasing”.

### - Leakage

Este tipo de error está relacionado con el tipo de ventana temporal usada para limitar en el tiempo la longitud de la función a analizar, y se debe a las oscilaciones que se producen en el origen de frecuencias cuando se aplica la DFT a la función de longitud  $T$ .

Este fenómeno se conoce con el nombre de "leakage" porque ocurre como si la energía o la potencia "se fugara" hacia el resto de las líneas espectrales, en lugar de permanecer concentrada en la frecuencia central de la ventana.



**Figura 3.4.- Representación gráfica de una función cosenoidal, una función cosenoidal truncada y sus respectivos espectros. [PF1]**

Para eliminar las perturbaciones, lo más frecuente es recurrir al uso de diferentes tipos de ventanas temporales, para generar una transformada que en el dominio de la frecuencia tenga una banda principal simétrica en frecuencias.

Por ejemplo, este efecto es más pronunciado con una ventana rectangular debido a la pobre atenuación de sus lóbulos laterales (solo 20 dB/década), reduciéndose mucho con una ventana Hanning (60 dB/década). [T2]



### - Efecto Picket Fence

Este efecto es debido a la forma no rectangular y al espaciamiento de los filtros. Recibe este nombre debido a que la respuesta característica de un banco de filtros recuerda una valla (picket-fence).

El resultado de multiplicar la función de ponderación (ventana) por los valores del registro temporal en el dominio del tiempo, equivalen en el dominio de la frecuencia a la obtención de un espectro en forma de uno o varios lóbulos extendidos alrededor de la frecuencia central, que luego son muestreados a intervalos discretos de la frecuencia para obtener valores discretos del mismo.

Si la frecuencia de una onda senoidal está exactamente en el centro de algún filtro, tendrá una amplitud de 0 dB. El error es función de la selectividad del filtro, el cual está determinado por el tipo de ventana usada: al usar una ventana Hanning el máximo error será de 1.4 dB y de 4.2 dB para una rectangular. Aumentando el ancho de cada filtro al doble y manteniendo su espaciamiento se consigue que el máximo error se reduzca a 0.35 dB (en el caso de la ventana Hanning), con la contrapartida de haber reducido la resolución.

El error que introduce el efecto Picket-Fence se puede eliminar, en gran medida, mediante el uso del Zoom FFT. Para evitar que se escapen los tonos espectrales se utiliza la ventana “Flat Top”, ya que, dada la anchura del espectro, hace posible la detección de tonos puros. [L1]

### **1.2. ZOOM FFT**

El algoritmo FFT descrito en apartados anteriores realiza un análisis en un rango de frecuencias que abarca desde 0 hasta la frecuencia Nyquist,  $f_N$  y la resolución viene determinada por el número de líneas de frecuencia hasta  $f_N$ , normalmente la mitad del número de muestras realizadas para digitalizar la señal temporal.

Sin embargo, en determinadas situaciones es necesario obtener una mayor resolución sobre una zona reducida del espectro (frecuencia de engrane por ejemplo, cuando se está analizando un reductor) y para realizar esta labor se desarrolló la técnica del zoom, que se basa en el análisis de una zona reducida del espectro de potencia, con el mismo número de líneas usadas para el espectro completo, incrementándose así la resolución tanto más cuanto menor sea el rango de frecuencias de la zona de interés. [T2]



Se puede realizar de dos maneras: reduciendo la frecuencia de muestreo o zoom en tiempo real (muestrear justo la zona a estudiar eliminando las zonas en las que pudiera producirse Aliasing), o incrementando la longitud del registro zoom no destructivo, con una transformada de mayor tamaño con el mismo número de registros, compensando las imprecisiones por pequeñas variaciones de velocidad de la máquina.

### **1.3. DEMODULACIONES O ANÁLISIS DE ENVOLVENTE**

Las señales se pueden modular en amplitud (la señal tendrá una componente transportadora, modulada en amplitud con un senoide de frecuencia más baja).

$$g_a(t) = \text{Re} \left[ A(t) \cdot e^{j \cdot 2\pi \cdot f_0 \cdot t} \right]$$

$f_0$  frecuencia constante de la onda transportadora

$A(t)$  función de la modulación de amplitud de la señal real.

El resultado serán un par de bandas laterales alrededor de la frecuencia transportadora, separadas por la frecuencia de modulación.

Además, se puede modular en frecuencia.

$$g_f(t) = \text{Re} \left[ A_0 \cdot e^{j \cdot (2\pi \cdot f_0 \cdot t + \beta \cdot \sin(2\pi \cdot f_m \cdot t))} \right]$$

$f_0$  frecuencia constante de la onda transportadora

$\beta$  máxima desviación de fase producida por la onda transportadora alrededor de la frecuencia  $f_0$

En este caso, se descompondrá la señal en amplitud y fase.

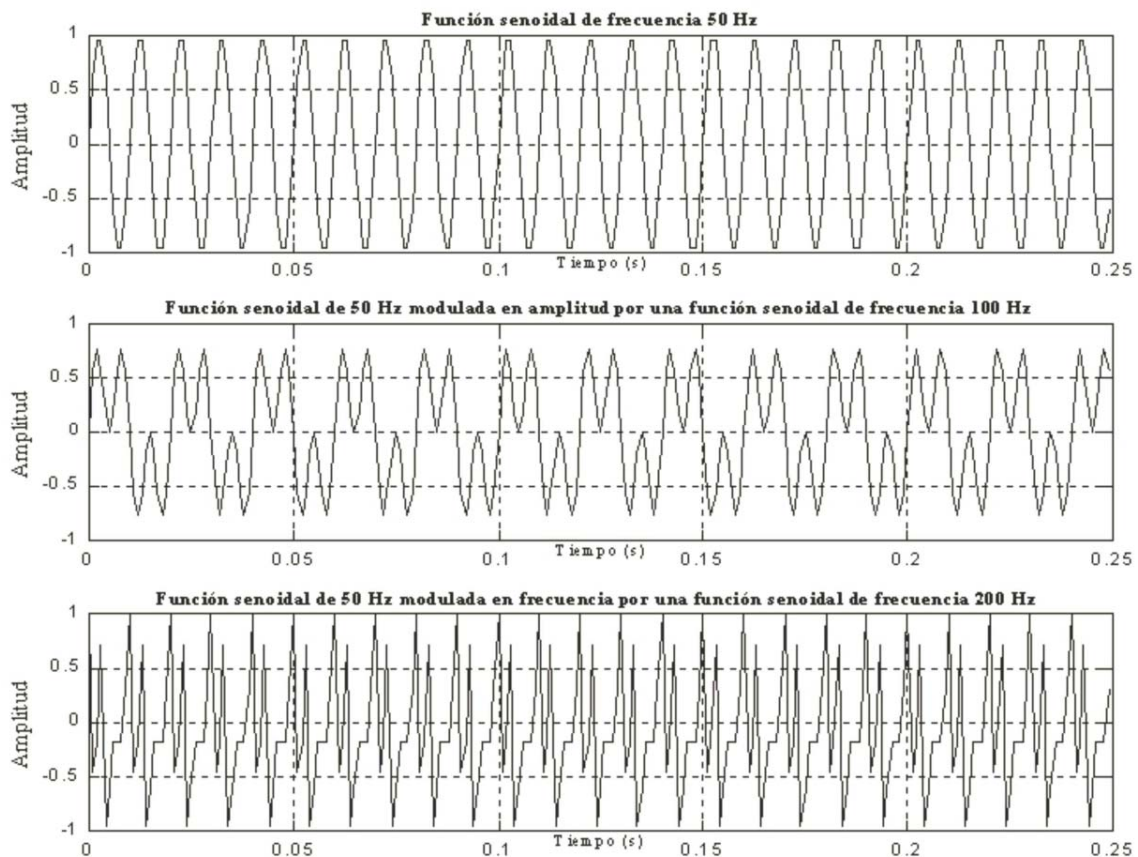


Figura 3.5.- Señal senoidal, señal modulada en amplitud, y señal modulada en frecuencia.

En la práctica, las bandas laterales procedentes de la modulación de amplitud, interactuarán con las procedentes de la modulación de frecuencia, eliminando la simetría de los modelos descritos.

En muchas ocasiones se presenta una vibración modulada en amplitud, que suele provenir de la excitación de elevadas frecuencias de resonancia, originadas por fuerzas impulsivas repetitivas producidas por ejemplo por un rodamiento defectuoso en una máquina rotativa. Es en estas situaciones donde precisamente adquiere relevancia la técnica de demodulación pues posibilitará separar los componentes de frecuencia repetitiva de tipo impulsivo del resto de frecuencias, para poder analizarlos.

Un análisis por demodulación o de envolvente será realizado de la siguiente forma:

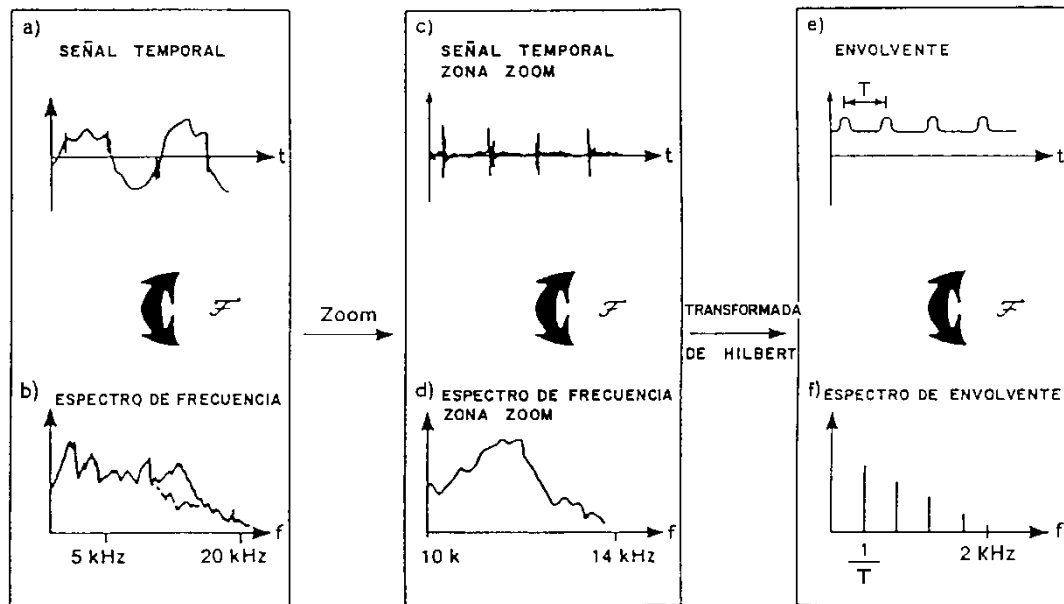


Figura 3.6.- Representaciones gráficas de diferentes técnicas de tratamiento y análisis de la señal vibratoria, en el dominio temporal y frecuencial. [P1]

En el procedimiento de demodulación partimos de una señal de tiempo de un elemento con defecto, que transformamos en su espectro frecuencial (resonancia excitada por los defectos). Realizamos un zoom sobre el espectro sacando su señal temporal también, y rectificamos la señal temporal, sacando después su espectro. Para minimizar las imprecisiones del rectificado se usa el proceso de la transformada de Hilbert.

Si partiendo de la señal  $a(t)$ , calculamos la transformada de Hilbert ( $\tilde{a}(t)$ ), formamos la señal analítica ( $a(t) + i \tilde{a}(t)$ ), y la descomponemos en su amplitud y fase, se extrae la componente de frecuencia transportadora, y la función de fase resultante es la señal de modulación que se buscaba.

La señal temporal envolvente obtenida será analizada en frecuencia para obtener las frecuencias de impacto, lo que indicará la presencia de un defecto en el rodamiento.

#### Consideraciones prácticas sobre la modulación [P1]

- La modulación en amplitud de señales vibratorias siempre crea bandas laterales en el espectro de la señal y el espaciado en frecuencia de las bandas laterales desde la frecuencia transportadora es igual a la frecuencia de la señal de modulación.



- Si existen bandas laterales alrededor de un componente del espectro, es evidente que existirá algún tipo de modulación, o en amplitud o en fase, lo que significa que hay una no-linealidad en el sistema que está generando las señales, y la señal resultante no es la suma de cada una de ellas (hay que tener en cuenta que las bandas laterales han sido generadas por el proceso de multiplicación de dos señales temporales).
- Los efectos de la modulación son aditivos. Una señal puede ser modulada por muchas frecuencias al mismo tiempo y cada una de estas frecuencias creará un juego de bandas laterales alrededor de la frecuencia transportadora. Normalmente es difícil identificar estas bandas laterales en el espectro cuando existen muchas.
- Si la frecuencia de modulación tiene armónicos, es decir, si no se trata de una señal puramente senoidal, en el espectro aparecerán una serie de bandas laterales, igualmente espaciadas, alrededor de la frecuencia transportadora. Estas bandas laterales se distribuirán en el espectro de la señal modulada con el mismo espaciado que los armónicos en la señal de modulación. Esto es muy común en la práctica y los “cursores de bandas laterales” de los analizadores se utilizan a menudo para identificar familias de bandas laterales.
- La amplitud de las bandas laterales está directamente relacionada con la amplitud de la señal de modulación y así, por ejemplo, duplicar el nivel de un componente del espectro demodulado significa duplicar el nivel de la señal de modulación.

#### **1.4. CEPSTRUM**

Se suele definir como el espectro del logaritmo de un espectro (amplitudes en escala logarítmica y frecuencias en escala lineal). Esta técnica es especialmente útil para detectar la periodicidad en un espectro, por ejemplo, una familia de armónicos con espaciamiento uniforme.

El proceso completo del análisis mediante Cepstrum es el siguiente:

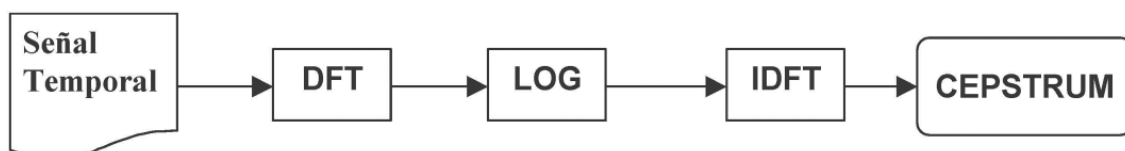


Figura 3.7.- Esquema del proceso realizado en el análisis mediante Cepstrum. [T3]



Por tanto, se puede relacionar con el espectro de potencia:

$$C(\tau) = [F(\lg F_{xx}(f))]^2$$

Siendo  $\tau$  la frecuencia en el espectro de potencia, y  $F_{xx}$  el espectro de potencia de  $x(t)$

E incluso con la transformada inversa de Fourier, o cepstrum de potencia.

$$C(\tau) = F^{-1}[\log F_{xx}(f)]$$

Una característica importante del cepstrum es su baja sensibilidad al camino recorrido por la señal desde la fuente interna de vibración al punto externo de medida.

Precisamente esta pérdida de sensibilidad al camino de transmisión de la vibración, si bien es la responsable de que pequeños cambios en la posición del acelerómetro pueda modificar la forma del espectro de vibración e influenciar significativamente en el nivel de las bandas laterales; en cambio, el correspondiente componente del cepstrum se mantendrá bastante constante.

Otro aspecto que puede modificar la forma del espectro, incluso con el mismo grado de defecto en el reductor, es la relación de fase para la modulación de amplitud y para la modulación de frecuencia.

Si bien ambas modulaciones están acopladas en la fuente, la modulación en frecuencia está más directamente relacionada con las características de torsión del sistema, mientras que la modulación de amplitud está más afectada por las características de respuesta lateral, y esto explica las desviaciones de fases.

Ambas modulaciones de forma aislada, tienden a dar familias simétricas de bandas laterales alrededor de la frecuencia de transporte, pero combinando las dos, generalmente se reforzarán en un lado y se cancelarán en el otro, lo que explica en parte la no-simetría encontrada generalmente en los espectros, si bien los efectos del camino de transmisión también modifican la simetría citada. El cepstrum reduce la sensibilidad a estos efectos de fase.

También resulta una gran ventaja el hecho de que una familia completa de bandas laterales se reduzca en el cepstrum a un solo pico.

Esto se puede observar en las siguientes figuras, donde se puede ver un espectro de frecuencia, frente a una señal de Cepstrum, donde se observan claramente dos familias de picos, asociados al defecto.

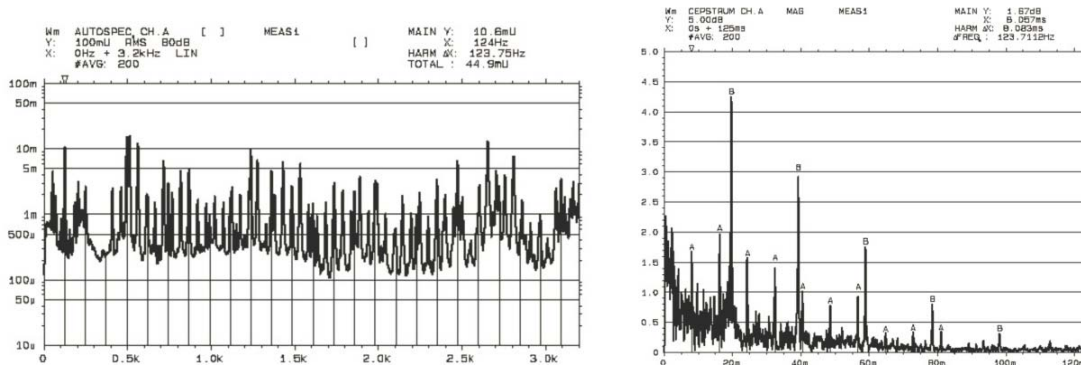


Figura 3.8.- Espectro de potencia de una señal de una máquina con defectos, y Cepstrum de una señal. [T3]

### **1.5. ANÁLISIS DE ÓRDENES A TRAVÉS DE LA FFT**

El análisis de órdenes es una herramienta muy útil para el análisis de vibraciones de máquinas rotativas con variaciones de velocidad, y particularmente cuando se analizan marchas y paradas, resonancias estructurales excitadas por frecuencias de rotación o sus armónicos, localización de velocidades críticas de ejes, etc. [T1]

La ventaja de esta técnica es que elimina el problema del “emborronamiento” de los picos aplicando el sencillo método de obligar a los componentes armónicos a localizarse en una línea espectral, impidiendo así la dispersión de la potencia de un componente en varias líneas espectrales.

La idea es recoger un tren de impulsos sincrónicos con la rotación del eje de la máquina de estudio y usarlos como referencia para generar el reloj interno del analizador.

### **1.6. ANÁLISIS DE LA VARIANZA**

La señal generada por un defecto localizado (firma), no se da normalmente periódica, como se podría deducir en el caso de un rodamiento, en los modelos matemáticos que definen las frecuencias de defectos, puesto que la trayectoria seguida por un elemento rodante varía en cada pasada, debido al hecho de que en cada una de estas pasadas contactará en diferentes áreas, lo que se explica por fenómenos tales como el deslizamiento, rotación de las bolas alrededor de diferentes ejes, etc. [T2]



El procedimiento se basa en descomponer la señal en sus componentes de señal periódica, envolvente y señal aleatoria continua, elevar al cuadrado, y volver a usar un promediado temporal para reducir la expresión. Este proceso es similar al cálculo de la varianza de una serie temporal a través del ordenador, es por lo que esta técnica recibe el nombre de análisis de la varianza, y es muy sensitiva a los defectos en rodamientos.

### **1.7. POTENCIA Y PSD DE UNA SEÑAL [P1]**

La potencia total de una señal es la potencia total del espectro, y puede definirse como:

$$P = \frac{1}{T_{\max}} \int_0^{T_{\max}} x^2(t) \cdot dt$$

De manera análoga, la potencia espectral total de una señal puede definirse como:

$$P = \int_0^{f_{\max}} G(f) \cdot df$$

donde  $G(f)$  será la densidad de potencia espectral de la señal, también denominada **PSD** (Power Spectral Density).

El proceso para calcular la PSD de una señal se puede resumir en tres puntos:

1. Se muestrea la señal para obtener  $x(i)$ .
2. Se aplica la transformada rápida de Fourier o FFT (Fast Fourier Transform), más concretamente la transformada rápida discreta de Fourier o DFFT (Discrete Fast Fourier Transform), a las  $N$  muestras de la señal  $x(i)$  y se obtiene  $X(k \cdot \Delta f)$ .
3. Por último, conocido el número  $N$  de muestras tomadas de la señal  $x(i)$  durante un tiempo  $T_t$ , con un intervalo de muestreo de  $\Delta T$ , y conocida también  $X(k \cdot \Delta f)$ , se le aplica la fórmula:

$$S(k \cdot \Delta f) = \frac{\Delta T}{N} \cdot |X(k \cdot \Delta f)|^2$$

### 1.8 SPIKE ENERGY [T3]

La Spike Energy es una medida de la intensidad de energía generada por la repetición de impactos mecánicos, siendo un método de análisis muy sensible a vibraciones de alta frecuencia. Estos impactos o pulsos ocurren típicamente debidos a defectos en rodamientos, engranajes..., pero también es aplicable a otro tipo de señales ultrasónicas como pueden ser turbulencias en líquidos, control de ruidos en válvulas...

La medida del Spike Energy se realiza a través de un acelerómetro, cuyas frecuencias naturales y las de los componentes de la máquina, son excitadas por los impactos mecánicos en el rango de las frecuencias altas, dando como resultado picos periódicos de energía a alta frecuencia. La magnitud encargada de medir esta señal se denomina 'gSE' (unidad de aceleración de Spike Energy).

La señal de vibración es medida filtrada con filtros pasa banda, para eliminar de la señal las vibraciones a bajas frecuencias, causadas por desalineamientos, desequilibrios..., que no son objeto de análisis con este método.

Posteriormente, la señal de vibración pasa a través de un detector pico a pico, el cual detecta y mantiene la amplitud pico a pico de la señal. La lectura en unidades gSE está determinada por la intensidad de estos picos de alta frecuencia.

El esquema de procesado de señal será similar al reflejado en la figura.

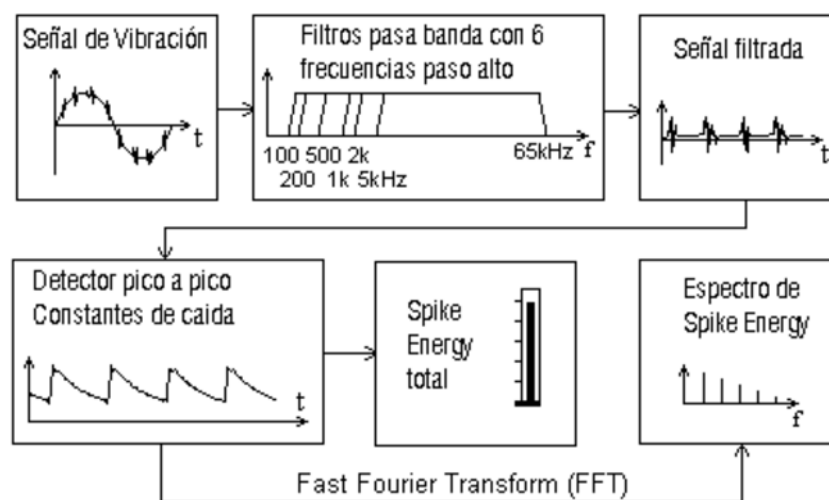


Figura 3.9.- Esquema del proceso de análisis de una señal vibratoria mediante Spike Energy. [T3]

En comparación con otros procesos de detección de defectos como la demodulación, el análisis Spike Energy no sólo mantiene el grado de severidad de los defectos, sino que además realza la frecuencia fundamental de estos defectos, así como sus armónicos.

El sistema de detección pico a pico que se utiliza es equivalente al mostrado en la figura:

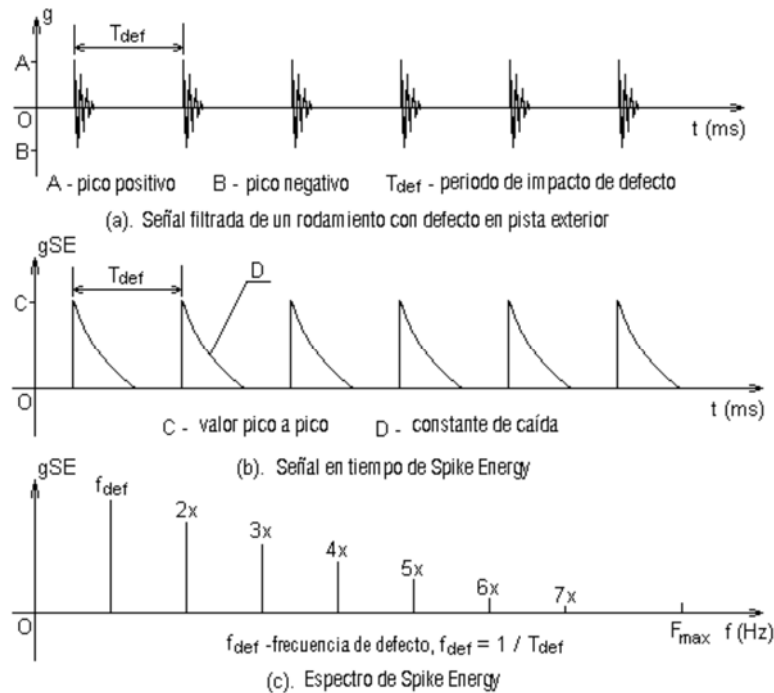


Figura 3.10.- Proceso de obtención del valor pico a pico y del espectro mediante Spike Energy. [T3]

### Consideraciones sobre la Spike Energy.

La Spike Energy es una medida de alta frecuencia y sus resultados pueden ser afectados por las condiciones del acelerómetro, por lo que se debe usar siempre el mismo para asegurar la consistencia de los resultados. Lo mismo ocurre con el lugar de toma de medidas y con el montaje del acelerómetro.

Dado que el análisis del Spike Energy se centra en la última zona del espectro, en la cuarta, hay que tener en cuenta lo que ocurre en esta zona. En la primera etapa empiezan a aparecer picos en la zona Spike Energy (y no en las otras). En esta primera etapa se está iniciando el defecto. A lo largo de la segunda y de la tercera etapa, estos picos irán aumentando tanto en número como en amplitud, mientras que en la cuarta etapa, la inmediatamente anterior al fallo catastrófico, los niveles de vibración disminuirán, para posteriormente incrementar de forma significativa en el momento de comenzar la rotura definitiva.



## 2. ANÁLISIS EN EL DOMINIO TEMPORAL

Algunos problemas mecánicos que surgen en las máquinas, se detectan mejor a través de un análisis en el dominio del tiempo que en el dominio de la frecuencia. El ejemplo más claro es un engranaje con un diente roto: El contacto en cada vuelta genera una onda con picos impulsivos, que difícilmente detectará el análisis en frecuencia. [T2]

Las técnicas más importantes relacionadas con este tipo de análisis y susceptible de ser aplicadas a la investigación es el **Promediado de la señal temporal**. Es una forma efectiva de reducir el contenido de componentes no deseados y de atenuar el ruido en la señal antes de realizar la FFT.

El espectro de una máquina contiene siempre ruido y componentes determinísticos. Los componentes aleatorios fluctúan en el tiempo observándose en ellos contribuciones positivas y negativas; la media aritmética de dichas contribuciones se hará cero sin más precauciones que elegir un número de datos a promediar suficientemente elevado.

Si los registros temporales se toman de la máquina, haciendo coincidir sincrónicamente con una determinada frecuencia (por ejemplo la frecuencia de giro de un eje, o un múltiplo de ella) y se promedian aritméticamente antes de proceder a realizar la FFT, los componentes de la señal con una frecuencia igual a la del giro del eje y sus armónicos estarán siempre en fase en todos los registros temporales, y por tanto, el promediado se realizará correctamente.

Si se puede producir una señal que contenga un número entero exacto de número de pulsos por revolución del eje, con dichos pulsos en fase con las rpm. del eje, la señal del sensor de vibración puede entonces ser muestreada y la primera muestra de cada revolución promediada sobre varias revoluciones; las siguientes muestras (segunda, tercera, etc.,...) se pueden tratar de una forma similar, para conseguir un promediado del conjunto para una revolución completa. Si se han tomado suficientes muestras, el promediado final describe sólo la vibración generada por el engranaje o engranajes del eje en particular.



### **3. ANÁLISIS EN EL DOMINIO DE LA AMPLITUD**

Las técnicas descritas anteriormente son de gran valor para la detección y diagnóstico de fallos en las máquinas; sin embargo, su uso requiere equipos caros, y personal técnico con conocimiento y experiencia en el análisis de señales, y además exige un tiempo de toma de datos y análisis de los mismos francamente importante.

Una industria con un volumen media-alto de máquinas, no puede permitirse realizar un seguimiento de las mismas basado en el uso periódico de dichas técnicas, por lo que ha de recurrir al dominio de la amplitud, midiendo amplitudes de vibración en aceleración, velocidad o desplazamiento en valores eficaces (RMS), pico-pico o bien, para mayor precisión, recurriendo a parámetros estadísticos. [T2]

A continuación se verán algunas de estas técnicas:

#### **3.1. NIVEL GLOBAL DE VIBRACIÓN**

Es el método más simple de medida (estas medidas se pueden tomar simplemente con un acelerómetro y un medidor de vibración con un filtro adecuado). La medida de aceleración es la que da los mejores resultados.

Consiste en determinar la raíz cuadrada del valor medio de las amplitudes de la señal temporal al cuadrado (RMS) sobre un amplio rango de frecuencias. El valor medido de RMS se lleva a una gráfica de tendencias donde se puede seguir la evolución de dicho valor a lo largo del tiempo.

Sin embargo, la práctica demuestra que cuando se detecta una elevación en el valor global de la vibración, generalmente el defecto ya se encuentra en un estado muy avanzado (caso terminal), por lo que este método avisa tarde de la existencia del problema y no especifica en qué consiste dicho problema. [T2]





### **3.2. FACTOR DE CRESTA**

El factor de cresta es la relación entre el valor pico de la vibración y su valor RMS.

Según se desarrolla el defecto, los impactos incrementan el valor de pico, pero al final de la vida tienden a igualarse, usándose para eliminar las vibraciones de fondo.

### **3.3. KURTOSIS**

Dos superficies mecanizadas rozando una contra otra, producen una vibración originada por las asperezas inevitables en cada una de ellas.

Esta vibración tiene una función de densidad de probabilidad muy próxima a la Gaussiana y a medida que ambas superficies se van deteriorando, la forma de la "campana de Gauss" correspondiente a la distribución normal, se va distorsionando, siendo los momentos estadísticos sensibles a estos cambios.

En general, los momentos impares están relacionados con la información acerca de la posición del pico de la curva de distribución de la densidad de probabilidad, mientras que los momentos pares indican la dispersión de la citada distribución.

DYER y STEWART demostraron que el cuarto momento normalizado al dividir por el cuadrado del segundo momento, relación que se conoce con el nombre de Kurtosis, toma un valor único de 3 si la distribución de las asperezas de la superficie es Gaussiana y que además, esta relación es muy sensible a las modificaciones producidas en las superficies rozantes por defectos, ya que la elevación a la cuarta potencia da un gran peso a los picos que originan los defectos.

En el caso concreto de rodamientos, este valor cambia significativamente con el grado del defecto y la gráfica "kurtosis Vs nivel de aceleración" establece a menudo el tipo de defecto. [T2]



#### **4. ANÁLISIS EN EL DOMINIO TIEMPO - FRECUENCIA**

El gran avance que se ha llevado a cabo en los últimos años ha sido el desarrollo de las técnicas de análisis en el dominio tiempo-frecuencia.

La primera técnica que se desarrolló fue la Distribución de Wigner-Ville, que da una representación de la señal en los dominios de la frecuencia y del tiempo simultáneamente, facilitando de esta forma la observación de cómo cambia con el tiempo el contenido espectral de la señal.

$$W(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t + \tau/2) \cdot s^*(t - \tau/2) \cdot e^{-j2\pi f\tau} \cdot d\tau$$

Que depende de la señal  $s(t)$  y su conjugada.

El resto de técnicas las veremos en el capítulo 4 de este proyecto.



## **5. ORÍGENES DEL ANÁLISIS MULTIVARIABLE**

En este último apartado vamos a hablar de las primeras técnicas precursoras del análisis multivariable.

En sus orígenes, se pensó que las teorías de estadísticas y probabilísticas eran herramientas ideales para las siguientes tareas:

- Reducción o simplificación de datos.
- Agrupamiento de datos.
- Correlaciones entre los diversos datos
- Pronóstico y predicción.
- Creación y comprobación de hipótesis

Estas primeras técnicas que se desarrollaron fueron:

### **5.1. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES**

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es una técnica estadística de síntesis de la información, o reducción de la dimensión (número de variables). Es decir, ante un banco de datos con muchas variables, el objetivo será reducirlas a un menor número perdiendo la menor cantidad de información posible.

Los nuevos componentes principales o factores serán una combinación lineal de las variables originales, y además serán independientes entre sí.

## 5.2. CLUSTER ANALYSIS [R8]

Intenta agrupar los datos en clusters, considerando las similitudes de todos los casos estudiados al mismo tiempo. Su objetivo es dividir la información disponible en subgrupos homogéneos donde los elementos de cada subgrupo son lo más similar posible, y lo más diferente posible de los otros subgrupos.

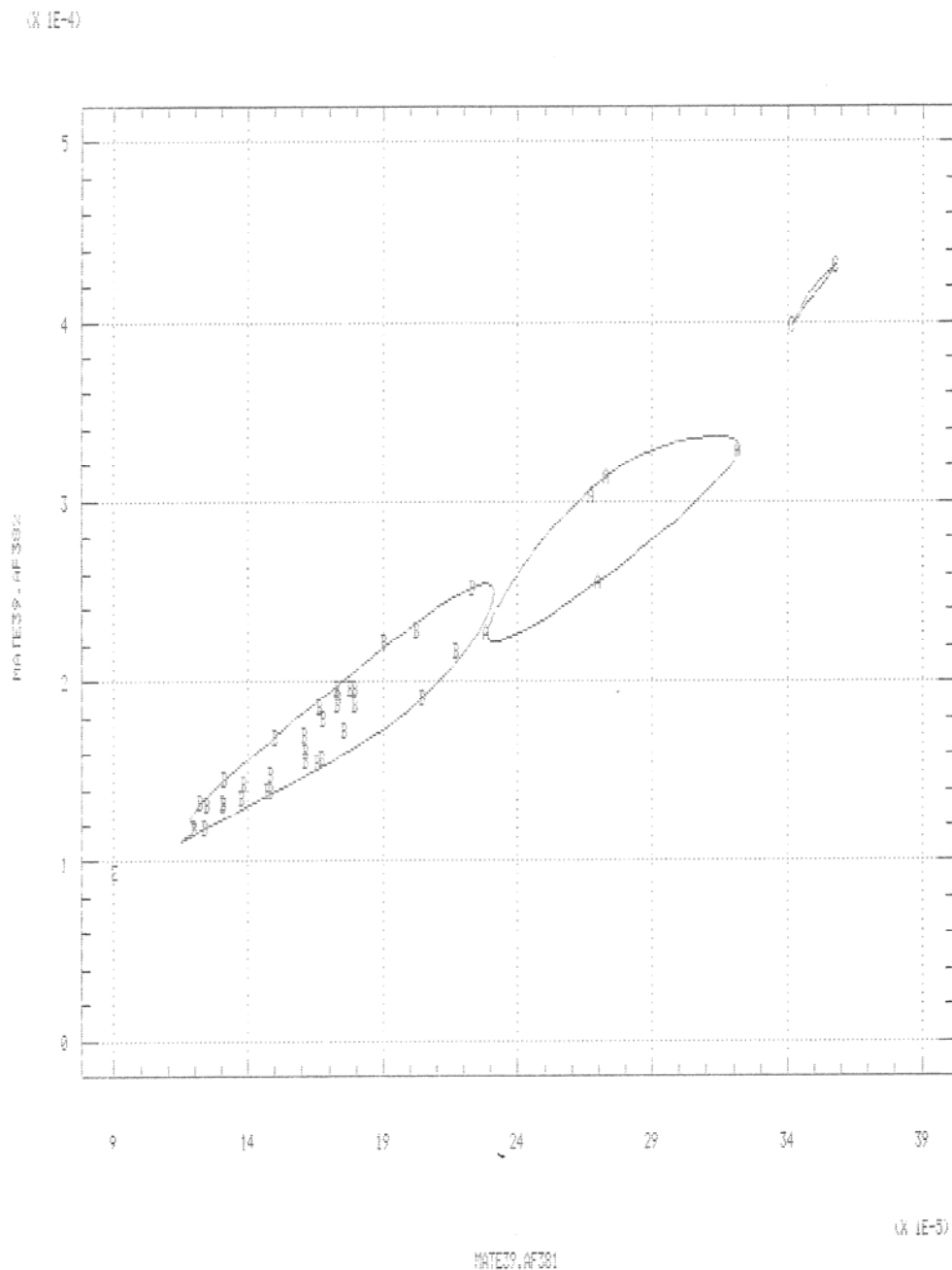


Figura 3.11.- Ejemplo de cluster analysis. [T1]



Para proceder a esa clasificación, se desarrolla en dos pasos:

1. Medida de las similitudes entre los casos: medida de la distancia entre dos cada par de casos. La distancia más común es el cuadrado de la distancia euclídea, definida como la suma del cuadrado de las diferencias entre los elementos variables.
2. Selección de los criterios de unión de los grupos: similitudes que unen los elementos de un subgrupo.

La distancia de dos cluster está definida como la media de las distancias entre todos los posibles pares de casos de los clúster resultantes.

### **5.3. ANÁLISIS DISCRIMINANTE** [R10]

El análisis se basa en las funciones discriminantes, que asumen que las mediciones de vibración son muestras aleatorias independientes obtenidas a partir de la distribución normal multivariante con matrices de covarianza iguales.

Para ello, el primer objetivo del análisis estadístico es encontrar el número mínimo de características (amplitudes de espectro en ciertas frecuencias) mediante la eliminación de las características con el poder menos discriminante. Para utilizar todo el conjunto de características con un rango matriz reducida, se investiga un análisis de componentes principales (ya visto).

Una vez que se estudian las componentes principales, se busca la combinación lineal de las variables que maximice las diferencias entre grupos.

La discriminación entre los grupos se realiza mediante el cálculo de unas funciones matemáticas denominadas funciones discriminantes

A partir de resultados estadísticos en defectos en rodillos de rodamiento, encontramos que el uso de análisis discriminante lineal y cuadrático y análisis de componentes principales ofrece algunos criterios útiles para la distinción entre los diferentes defectos.

Esta circunstancia se ve reflejada en el siguiente gráfico donde se han ordenado los datos de acuerdo al análisis discriminante, y que proviene de la tesis de Juan Carlos García Prada.

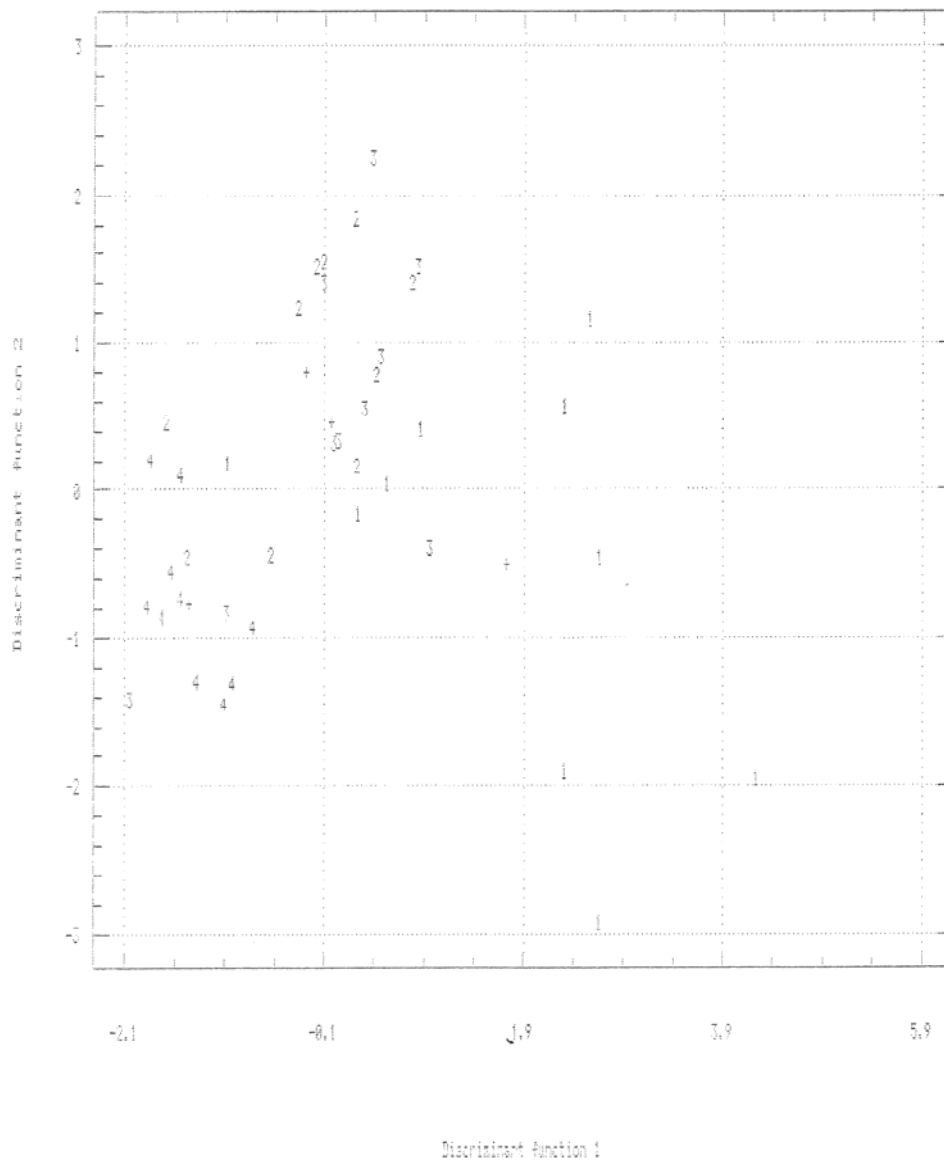


Figura 3.12.- Ejemplo de análisis discriminante. [T1]



## **TEMA 4:**

### **NUEVAS TÉCNICAS APLICABLES AL ANÁLISIS DE SEÑALES DE VIBRACIÓN**







El gran avance que se ha llevado a cabo en los últimos años ha sido el desarrollo de las técnicas de análisis en el dominio tiempo-frecuencia.

El análisis espectral clásico es adecuado para analizar vibraciones compuestas de ciertos componentes estacionarios durante su periodo de análisis. Esto implica que si se producen efectos transitorios en la vibración, éstos se promedian en el periodo de análisis, perdiéndose toda información sobre la naturaleza o forma de estas variaciones. Existe entonces la necesidad de un análisis que describa mejor señales no estacionarias o transitorias. Esto se consigue con las distribuciones o transformadas tiempo-frecuencia.

Las transformadas tiempo-frecuencia son análisis tridimensionales amplitud- tiempo-frecuencia; es decir, se agrega una nueva dimensión, el tiempo, a la clásica FFT.

Existen varios tipos de transformadas tiempo-frecuencia, las cuales se pueden clasificar en lineales y no lineales. Dentro de las primeras las más conocidas son la transformada corta de Fourier (Short Fast Fourier Transform) y las Wavelets. Dentro de las no lineales están la pseudo transformada de Wigner-Ville, la Choi-Williams, la transformada ZAM. Estas transformadas se están implementando actualmente en algunos analizadores de vibraciones comerciales debido a que su uso no se aplica de forma directa como con la FFT. Se requiere para su uso gran conocimiento del usuario y dependiendo del problema a analizar es más útil usar una u otra transformada.

Una de las razones del gran empujón que se ha producido en estos últimos años a los tratamientos de datos, ha sido el desarrollo de dispositivos especializados en el procesado digital de señales o DSP's.

Gracias a este desarrollo, cada vez se encuentran nuevas aplicaciones: comunicaciones sin hilo, procesamiento de audio y vídeo, control industrial...

A continuación, se explican los marcos teóricos de las mismas

**1. TRANSFORMADA DE FOURIER O FT (FOURIER TRANSFORM)**

Aunque este tipo de transformada ya se ha tratado en el capítulo anterior, lo volvemos a tratar con las nuevas aplicaciones que se han introducido.

A principios del siglo XIX, Joseph Fourier formuló su teoría de análisis de frecuencia, ahora conocida como Síntesis de Fourier, y que está considerada como la base del análisis moderno de señales.

La idea básica de las series de Fourier es que toda función periódica  $f(x)$ , de periodo  $T$  puede ser expresada como una suma trigonométrica de senos y cosenos del mismo periodo  $T$ . Esta suma de senos se denomina serie de Fourier, la descomposición en serie de Fourier de una señal cualquiera facilita en gran medida su análisis y es una técnica muy utilizada en el tratamiento de señales.

Fourier introdujo el concepto de que una función arbitraria (periódica) puede ser representada mediante una expresión analítica simple, al superponer funciones base ortonormales (seno y coseno), como muestra la ecuación, que logra trasladar una señal del dominio temporal a un dominio en frecuencia. El análisis de la señal en frecuencia, para un período ( $P$ ), viene dado por los coeficientes ( $n$ ) de estas bases ortonormales, los cuales representan la contribución de los componentes seno y coseno de la señal en todo el rango de frecuencias.

$$f(x) = \frac{a_0}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \left( a_n \cos\left(\frac{n\pi x}{P}\right) + b_n \text{sen}\left(\frac{n\pi x}{P}\right) \right) \right\}$$

Donde los coeficientes de Fourier se calculan a través de las ecuaciones que se presentan a continuación:

$$a_n = \frac{1}{P} \int_{x_0}^{x_0+2P} f(x) \cos\left(\frac{n\pi x}{P}\right) dx$$

$$b_n = \frac{1}{P} \int_{x_0}^{x_0+2P} f(x) \text{sen}\left(\frac{n\pi x}{P}\right) dx$$

De esta manera disponemos de dos formas diferentes de representar las señales: en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia. Ambas representaciones disponen de la misma información sobre la señal, siendo los enfoques completamente diferentes.

En la figura 4.1 se muestran ambas representaciones para distintas señales:

- Las dos primeras señales son dos senos; la frecuencia del segundo es superior a la del primero, como se puede observar en el análisis en frecuencia.
- La tercera señal es la suma de las dos primeras, y tras aplicar la transformada de Fourier se observan las frecuencias de ambos armónicos.

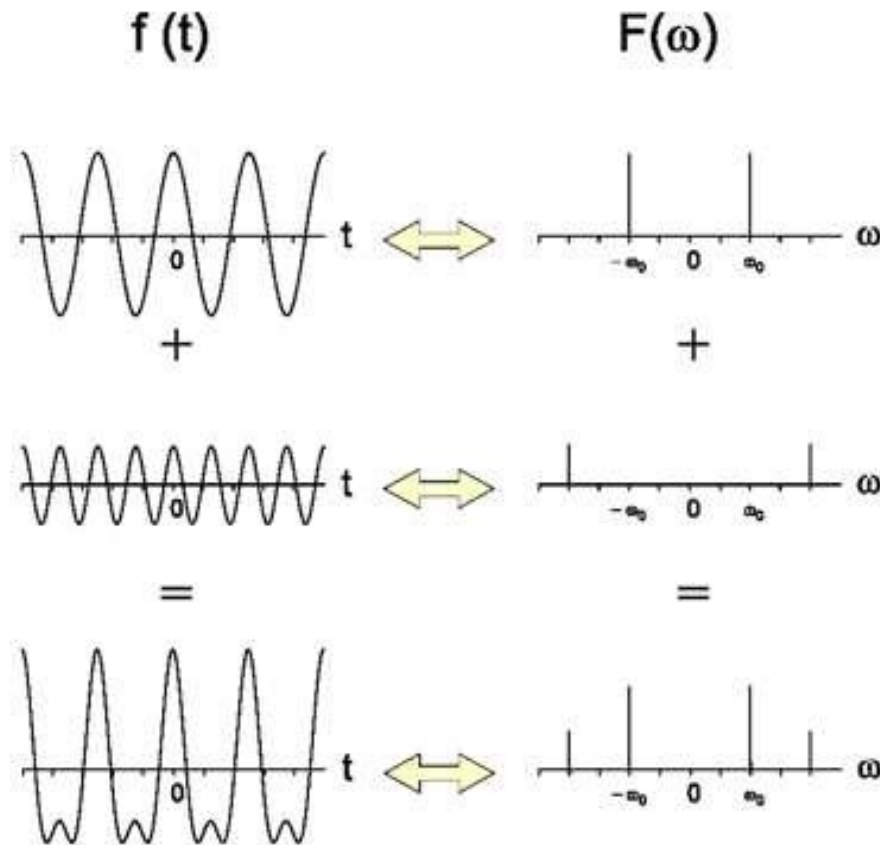


Figura 4.1.- Análisis tiempo-frecuencia de varias señales. [P3]

Cuando tratamos con señales más complicadas compuestas por una gran cantidad de armónicos, el análisis en el dominio de la frecuencia nos permite distinguir las frecuencias de los armónicos principales, labor que sería casi imposible si sólo dispusiéramos del análisis temporal, como podemos observar también en la siguiente figura de una señal compleja:

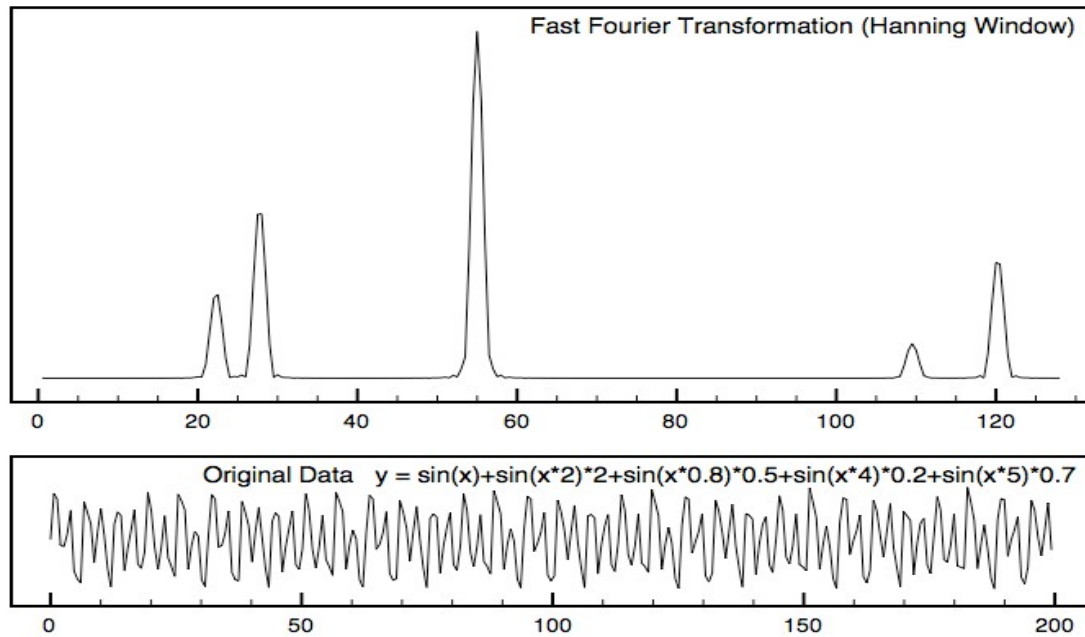


Figura 4.2.- Representación FFT de una señal compleja. [P4]

Se ha alcanzado un gran éxito aplicando la transformada de Fourier en el procesamiento de señales estacionarias ya que somos capaces de determinar el espectro de frecuencias de la señal, y con él, las frecuencias fundamentales que aparecen en una señal. Si somos capaces de entender a qué corresponden, seremos capaces de clasificar defectos sin necesidad de un potente sistema de clasificación.

Sin embargo el problema de esta transformada surge a la hora de analizar señales transitorias en las que el espectro de frecuencias no es el mismo en cada instante de tiempo. En este caso nos encontraríamos ante el dilema de que existirían infinitos espectros de frecuencias para una única representación temporal. De modo que si representamos la señal en el dominio del tiempo no tenemos información sobre la frecuencia y si localizamos la señal en el dominio de la frecuencia perdemos por completo la información temporal.

### **1.1. TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER O FFT (FAST FOURIER TRANSFORM)**

En el año 1965 se gesta el desarrollo de una implementación computacional para la Transformada de Fourier, denominada Transformada Rápida de Fourier (FFT), que permitió la primera aplicación del análisis espectral en tiempo real. La FFT mejoró la eficiencia computacional de la Transformada de Fourier de una señal discreta, y se ha utilizado tradicionalmente en el diagnóstico de defectos en rodamientos.

A pesar de su fácil implementación práctica, existen muchas desventajas asociadas a la técnica de la FFT. La primera de ellas es que no proporciona ninguna información acerca del dominio del tiempo de la señal, omitiendo detalles valiosos del fenómeno físico en estudio. Esto genera un gran problema a la hora de evaluar señales de naturaleza no estacionaria, donde es particularmente beneficioso obtener una correlación entre el dominio de la frecuencia y del tiempo.

Adicionalmente, los impulsos vibratorios que genera un defecto incipiente en un rodamiento son difícilmente detectables con este esquema, al menos hasta que el defecto logre afectar en alto grado al sistema, debido a que la FFT es incapaz de representar funciones no periódicas de manera precisa, como las señales que poseen impulsos transitorios.

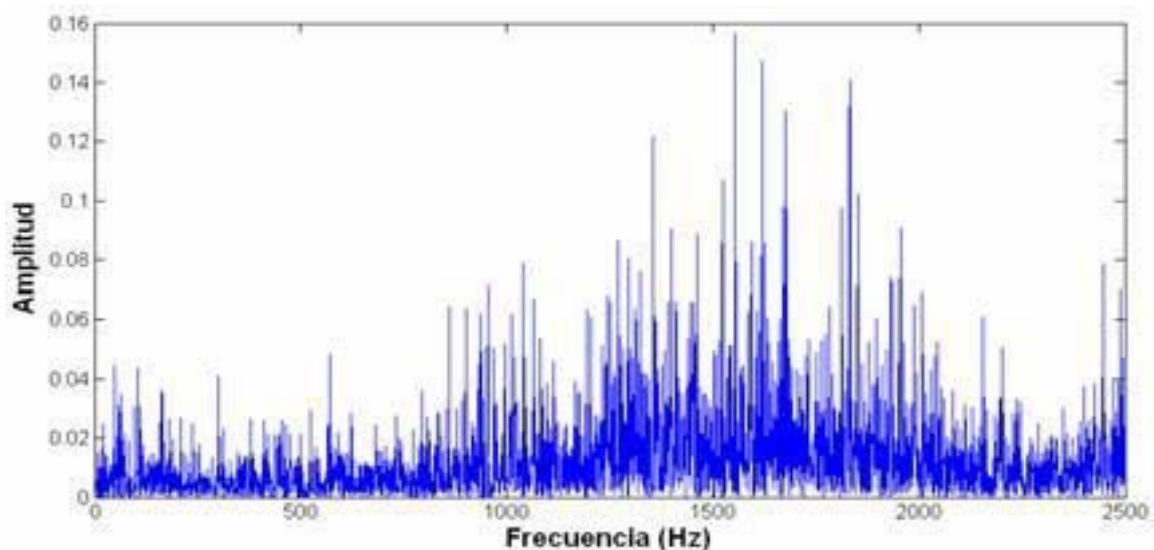
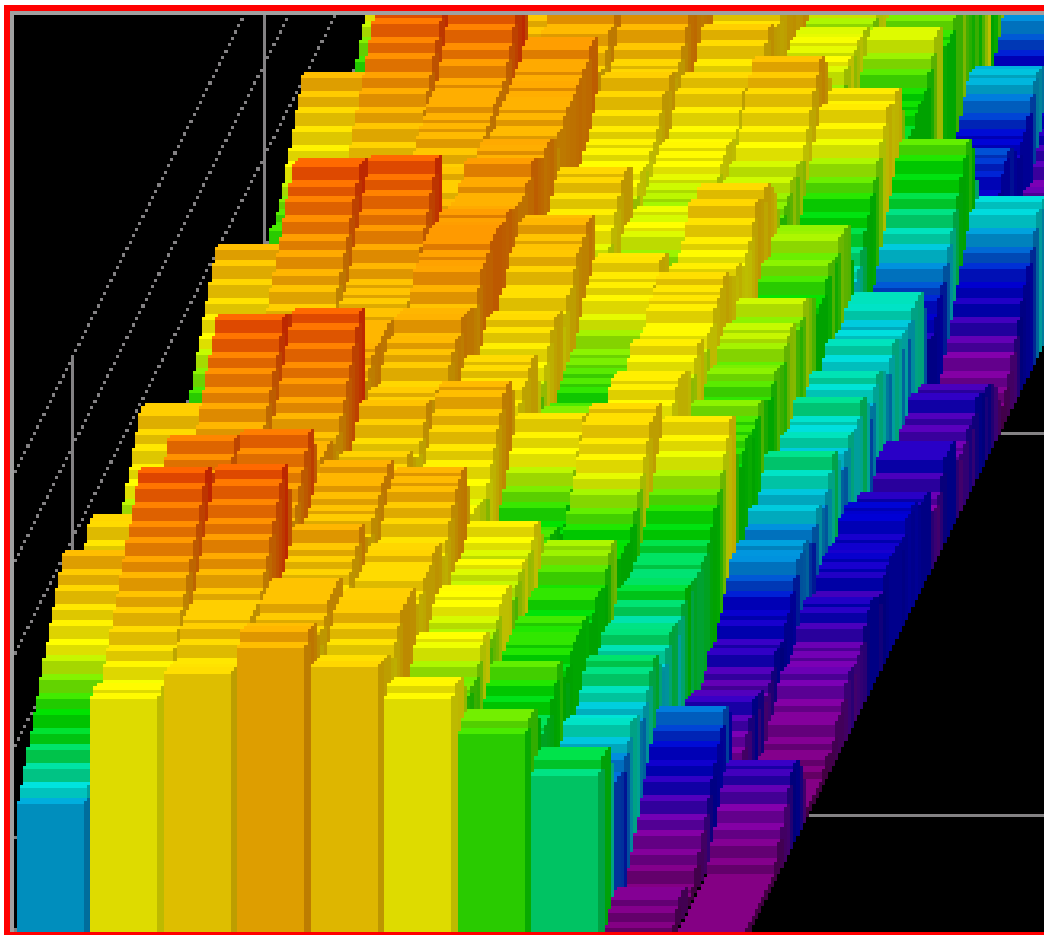


Figura 4.3.- Procesamiento de una señal vibratoria con la Transformada Rápida de Fourier. [P5]

## **1.2. TRANSFORMADA CORTA DE FOURIER Ó TCF**

Para resolver las limitaciones de la FFT, en los últimos años se han desarrollado otras técnicas suplementarias para el análisis de señales no estacionarias, entre ellas, la Transformada Corta de Fourier (TCF) también denominada STFT (Short Term Fourier Transform), y la Distribución Wigner-Ville (WVD).

La idea básicamente consiste en dividir la señal unidimensional en pequeños espacios temporales en los cuales seamos capaces de calcular el espectro de frecuencias de cada uno de ellos, a través de la multiplicación de la señal a analizar por una función ventana. Se puede ver un ejemplo de la STFT en la ilustración.



**Figura 4.4.- Representación STFT de una señal musical. [P4]**

Estos métodos realizan la transformación de una señal unidimensional, a una función de dos dimensiones de tiempo y frecuencia, a través de la multiplicación de la señal a analizar por una función ventana.



Sin embargo, cada uno de estos métodos de análisis tiempo-frecuencia presenta diversos problemas.

La principal desventaja de la TCF (STFT) es que posee una resolución limitada para el dominio del tiempo y de la frecuencia, ya que se utiliza el mismo ancho de ventana (el tamaño del diferencial temporal) durante el análisis de la señal entera. Esto origina que la resolución sea constante, y significa que, si se desea obtener un resultado con una buena resolución en frecuencia utilizando ventanas amplias (para el análisis de señales con componentes de baja frecuencia), la técnica no sería capaz de conseguir una buena resolución en el tiempo (ventanas estrechas), lo cual es importante para análisis de señales con componentes de alta frecuencia. Si lo que se desea es obtener una resolución grande en el espacio temporal elegiremos una ventana de poca longitud, a costa de dispersar la distribución espectral, no pudiendo conocer con exactitud sus componentes. Por el contrario, la elección de una ventana grande nos permitirá conocer los componentes frecuenciales a costa de perder información del momento en el que ocurren.

Por este motivo, la TCF (STFT) es adecuada para el análisis de señales cuasiestacionarias (estacionarias a la escala de la ventana), que no representan precisamente el comportamiento de señales reales.

Otra desventaja es que no existen bases ortogonales para la TCF, de modo que resulta complicado encontrar un algoritmo rápido y efectivo para calcularla.

Como solución a estos problemas de tamaño de la ventana existen métodos más modernos que la STFT como la Transformada Wavelet de la cual hablaremos más adelante.



## **2. TRANSFORMADA DE HILBERT HUANG**

Ya hemos visto que se puede enfocar el análisis de la señal de vibración desde dos puntos de vista complementarios, la frecuencia y el tiempo. Ahora se plantea un problema existente en casi todas las señales físicas. ¿Qué pasa si nuestro espectro en frecuencias no es el mismo para diferentes instantes de tiempo?

La mayoría de las señales reales (el ejemplo más claro es la señal de vibración de un rodamiento defectuoso en funcionamiento) contienen datos no estacionarios y no lineales, de tal manera que su espectro en frecuencias varía en distintos instantes de tiempo. El gran problema que encontramos es que si representamos la señal en el dominio del tiempo no tenemos información sobre la frecuencia, y si localizamos la señal en el dominio de la frecuencia perdemos la información temporal.

Por tanto, es necesario tratar este tipo de datos con un método adaptativo, donde la definición de la base depende de los propios datos, lo que rompe con los métodos tradicionales de análisis de señales. La transformada de Hilbert-Huang cumple esta condición. [P5]

El gran problema de la transformada es que al definir la base a posteriori, es difícil encontrar una base teórica firme; ahora bien, es el método empírico que presentaba mejores aproximaciones que los métodos tradicionales para representaciones tiempo-frecuencia-energía.

La transformada de Hilbert-Huang se puede dividir en dos etapas: descomposición modal empírica y análisis espectral de Hilbert.

### **1. Descomposición modal empírica**

La descomposición modal empírica se basa en la suposición de que cualquier conjunto de datos puede dividirse en un conjunto de modos de oscilación intrínsecos. Cada modo de vibración, lineal o no, representa una oscilación simple que tiene el mismo número de extremos relativos y puntos de corte con el eje OX. Además la oscilación será simétrica respecto de su media local. Es decir, en un instante de tiempo los datos tienen una gran cantidad de modos de oscilación, cuya suma es el estado de vibración total. Cada uno de los modos de vibración se llama función modal intrínseca (FMI, ó IMF, del inglés intrinsic modal function) y puede definirse de la siguiente manera:



- En el conjunto total de datos el número de extremos y ceros debe ser igual. Entendiendo por extremos los máximos y mínimos relativos de la función que representa la señal y por ceros los puntos de corte con el eje de abscisas.
- En cualquier punto, el valor medio de la envolvente definida por los máximos relativos y la envolvente definida por los mínimos relativos es cero.

El algoritmo de la Descomposición Modal Empírica es el siguiente:

1. Se identifican los máximos y los mínimos y se traza una spline cúbica que pase por todos los máximos y otra que pase por los mínimos, la media de ambas splines será  $m_1(t)$ .
2. Se resta dicha media al conjunto total de datos  $x(t)$  obteniendo  $h_1(t)$

$$h_1(t) = x(t) - m_1(t)$$

3. Volvemos a repetir este proceso con  $h_1(t)$ , y obtendremos la media  $m_2(t)$  y un nuevo subconjunto  $h_2(t)$ . Este proceso, denominado “shifting process” debe ser repetido tantas veces como sea necesario hasta conseguir una FMI.

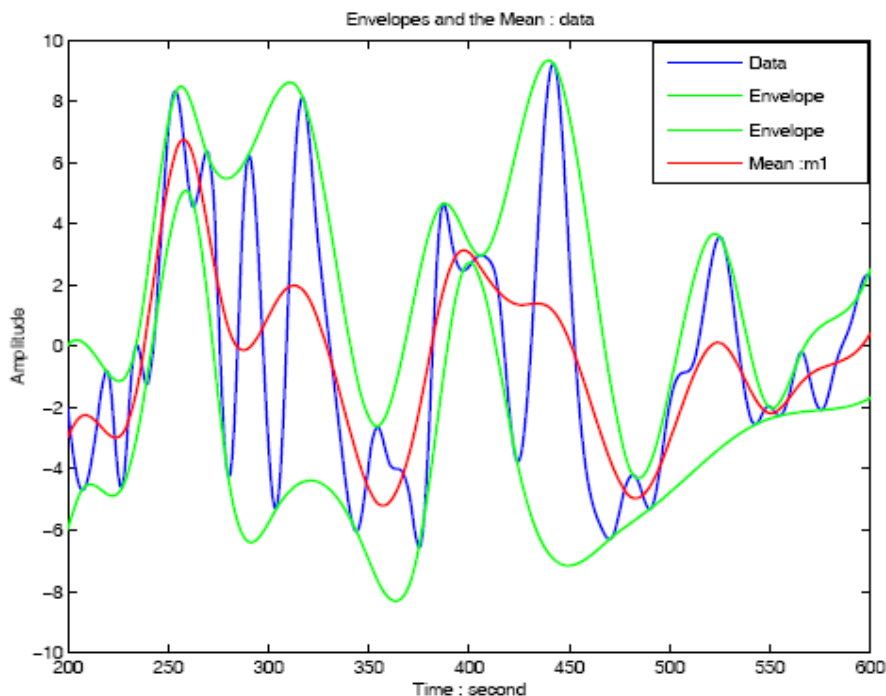


Figura 4.5.- Ejemplo del proceso “Shifting” en su primera iteración. [P3]

Surge la necesidad de establecer un criterio de parada. Hay dos posibilidades:

- La primera de ellas es que la diferencia cuadrática entre dos muestras consecutivas sea menor que un valor prefijado.

$$SD_k = \frac{\sum_{t=0}^T |h_{k-1}(t) - h_k(t)|^2}{\sum_{t=0}^T h_{k-1}(t)^2}$$

El problema es que este criterio de parada no asegura que nuestra FMI tenga el mismo número de extremos y ceros.

- Huang propone un segundo método, donde el proceso parará cuando el número de ceros y extremos difiera en no más de 1 consecutivamente durante un número prefijado de veces. Tras algunos estudios se determinó que dicho número debe estar comprendido entre 4 y 8 veces.

4. Una vez se cumple el criterio de parada separamos nuestra FMI, se la restamos a los datos iniciales obteniendo un residuo al que volveremos a aplicar el shifting process.

5. Seguiremos aplicando la descomposición hasta que se cumpla uno de los dos siguientes criterios: el valor de los residuos es muy pequeño, o que sean una función sin extremos relativos de la que no se podrán extraer más FMI.

6. El resultado final será un conjunto de FMI como las mostradas en la figura 4.6.

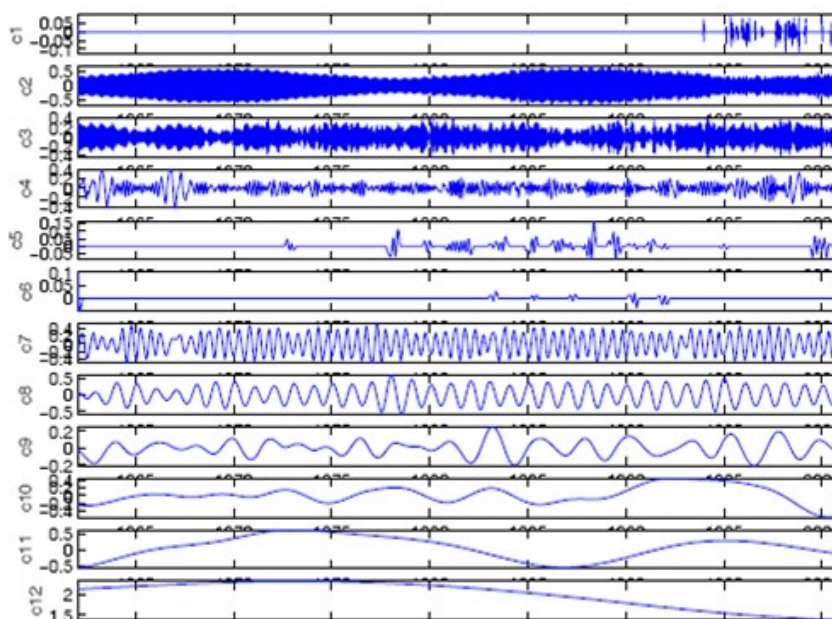


Figura 4.6.- Descomposición Modal Empírica de una señal. [P5]

Evidentemente la señal inicial puede recomponerse sumando los FMI obtenidos y los residuos finales; dichos residuos suelen despreciarse al efectuar el análisis posterior.



## 2. Análisis espectral de Hilbert

Una vez hecha la descomposición modal empírica puede aplicarse la Transformada de Hilbert a cada una de las FMI obtenidas. El motivo para realizar la descomposición es poder encontrar las frecuencias instantáneas de la señal. Antes de que Huang introdujera la DME, la utilización de la transformada de Hilbert se limitaba a señales con el mismo número de extremos y ceros.

La transformada de Hilbert,  $H[x(t)]$ , de una señal  $x(t)$  se define como:

$$y(t) = H[x(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(u)}{t-u} du$$

Y la señal analítica,  $z(t)$ , se define como:

$$z(t) = x(t) + jy(t) = a(t)e^{j\theta(t)}$$

Donde:

$$a(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)}$$

$$\theta(t) = \arctg\left(\frac{y(t)}{x(t)}\right)$$

Por último podemos hallar la frecuencia instantánea por medio de la ecuación:

$$\omega(t) = \frac{d\theta}{dt}$$

Con estos datos puede realizarse una gran cantidad de análisis, todos los ensayos indican que la transformada de Hilbert-Huang es una herramienta muy potente para el análisis tiempo frecuencia de señales no lineales y no estacionarias. Está basada en una base adaptativa y la frecuencia se define a través de la transformada de Hilbert.



### **3. TRANSFORMADA WAVELET**

Otro método para tratar los datos no estacionarios es la transformada de Wavelet.

El Análisis Wavelet es el siguiente paso lógico en la evolución del procesamiento de señales, y ofrece una técnica adecuada tanto para análisis de señales estacionarias, como no-estacionarias. Proporciona un análisis de resolución múltiple (en el tiempo y frecuencia), a diferentes escalas y resoluciones: para altas frecuencias, la Wavelet alcanza alta resolución en el tiempo (disponemos de un mayor número de muestras para el mismo espacio de tiempo) y baja resolución en frecuencia; a bajas frecuencias, la Wavelet alcanza alta resolución en el dominio de la frecuencia y baja resolución en el dominio del tiempo. Esta habilidad de la WT para adaptarse al espacio tiempo-frecuencia, le permite realizar una función importante en el campo de diagnóstico de defectos.

En el año 1909 se hizo la primera mención de la palabra Wavelet, en la tesis del científico húngaro Alfred Haar. Desafortunadamente, la Wavelet de Haar no es diferenciable, lo cual limita su aplicabilidad. Casi dos décadas más tarde, muchos grupos de trabajo independientes investigaron la representación de funciones por métodos que varían en escala, a través del desarrollo del concepto de funciones base, de esta forma surgió el enfoque moderno de las Wavelets.

Mientras que la Transformada de Fourier traslada una señal del dominio temporal a un dominio en frecuencia utilizando senos y cosenos como funciones base, la Transformada Wavelet traslada una señal del dominio espacial al dominio en escala mediante el uso de “Wavelets”. Las “Wavelets” (diminutivo de “Wave”, ola en inglés) son un grupo infinito de funciones base de naturaleza oscilatoria, con energía finita, que se encuentran definidas en el espacio y se emplean como funciones de análisis en el plano tiempo-frecuencia para obtener sus características periódicas y no periódicas.

El análisis wavelet es una herramienta matemática que descompone una señal temporal en suma de diferentes señales temporales denominadas funciones wavelets hijas. Cada una de estas tiene diferentes escalas en diferentes niveles de resolución obtenidos mediante escalado y dilatación de una determinada función matemática temporal denominada función wavelet madre. Una familia de Wavelets está definida por la ecuación:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, b \in \mathbb{R} \quad a > 0$$



Cada uno de los componentes de la familia se genera a partir de la Wavelet Madre  $\psi(t)$ , a través de las variables de escala (a), que permite hacer dilataciones y contracciones de la señal, y la traslación (b), que se encarga de mover la señal en el tiempo.

Las principales familias de Wavelets son Daubechies, Biortogonales, Coiflets, Symlets, Morlet, Sombrero Mexicano y Meyer. Todas ellas tienen una ecuación específica que las representa, y que las hace diferenciarse en su forma, como muestra la figura.

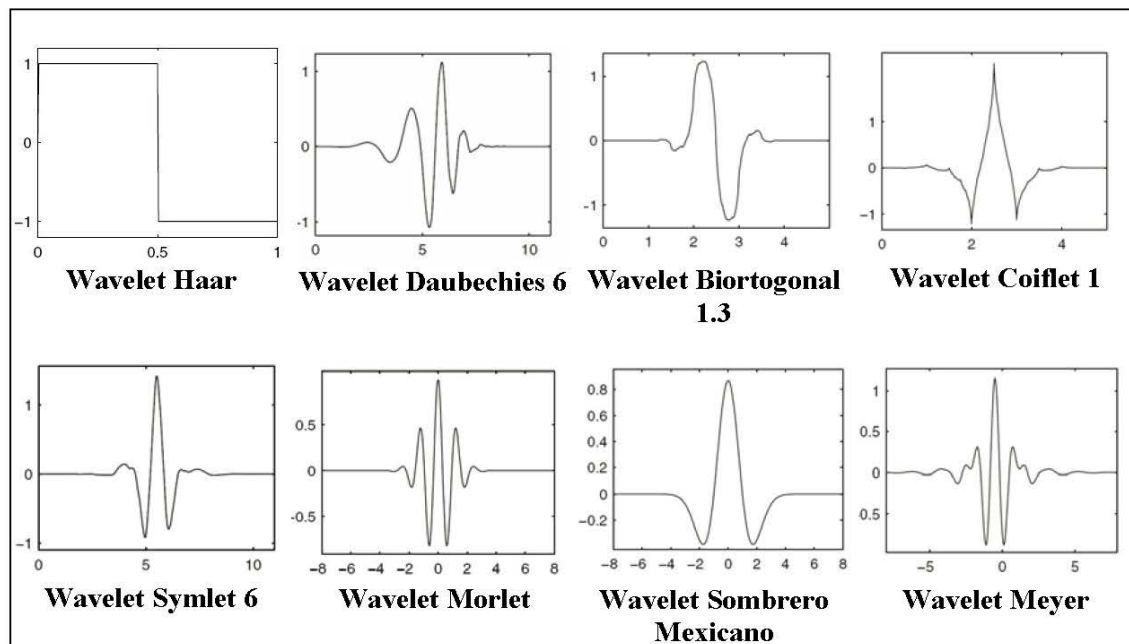


Figura 4.7.- Familias de Wavelets madre más empleadas. [T4]

La interpretación física de la WT es sencilla, los coeficientes muestran como varía la energía de una señal con respecto al tiempo y la frecuencia. El problema principal es que el diagnóstico final debe hacerlo un experto en el tema para identificar la información que saca a la luz el Análisis Wavelet, lo que limita la automatización del proceso.

Las Transformadas Wavelets comprenden la Transformada Continua, la Transformada Discreta, y la Transformada Estacionaria. Estas son las herramientas matemáticas que permiten el análisis de señales de manera muy similar a como lo hacen las Transformadas de Fourier, dando información en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia.



### 3.1. TRANSFORMADA WAVELET CONTÍNUA (TWC)

A mediados de la década de los setenta y principios de la década de los ochenta, Morlet introduce la TWC en la comunidad geofísica internacional, como una técnica alternativa a la Transformada Corta de Fourier STFT (TCF), para superar el problema de resolución causado por el solapamiento de datos.

La TWC se realiza de manera similar al análisis STFT, pero la señal es multiplicada por una función, en este caso denominada “Wavelet” (análoga a la función ventana de la STFT), cuyas características de escala y traslación serán permanentes para todo el proceso. De tal manera, la transformada se calcula separadamente para distintos segmentos de la señal en el dominio del tiempo, y si los sumamos obtendremos la señal trasladada del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia y el tiempo.

La señal transformada (TWCt) se calcula según la ecuación:

$$TWC_t(a, b; \psi) = a^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt$$

En donde  $f(t)$  es la señal a la cual se aplica la transformada,  $\Psi^*(t)$  es el conjugado complejo de la Función Wavelet  $\Psi_{a,b}(t)$  y TWCt es una función de dos variables,  $a$  y  $b$ , parámetros de escala y traslación respectivamente, que irán cambiando de valor a lo largo del proceso de análisis, y cuyo fundamento se explica a continuación:

**Escala (a):** La escala en el análisis Wavelet es análoga a la escala de los mapas geográficos. Las altas escalas corresponden a una visión global no detallada de la señal, y las bajas escalas corresponden a una visión detallada. De igual manera, en términos de frecuencia, las bajas frecuencias (altas escalas) corresponden a una información global que comúnmente abarca toda la señal, mientras que las altas frecuencias (escalas bajas) corresponden a una información detallada de una característica oculta en la señal, que se produce en un tiempo relativamente pequeño. De esta manera, el escalado como operación matemática produce una dilatación o compresión de la señal; los valores altos de escala corresponderán a señales dilatadas y las escalas pequeñas corresponden a señales comprimidas. La relación entre escala y frecuencia es:

$$F_a = \frac{F_c}{a \cdot \Delta}$$

Siendo: “a” la escala, “Δ” la frecuencia de muestreo (Hz), “Fc” la frecuencia central de la Wavelet (Hz), y Fa la pseudo-frecuencia correspondiente a la escala a (Hz)

**Traslación (b):** El término traslación se relaciona con la localización de la ventana a medida que ésta se desplaza a lo largo de la señal. Obviamente, este término corresponde a la información del tiempo en el dominio transformado.

La traslación se realiza sobre el dominio del tiempo, mientras que el escalado se realiza conforme a la dilatación y compresión de ventanas, obteniendo coeficientes de correlación.

Una representación esquemática del Análisis Wavelet se ilustra en la figura.

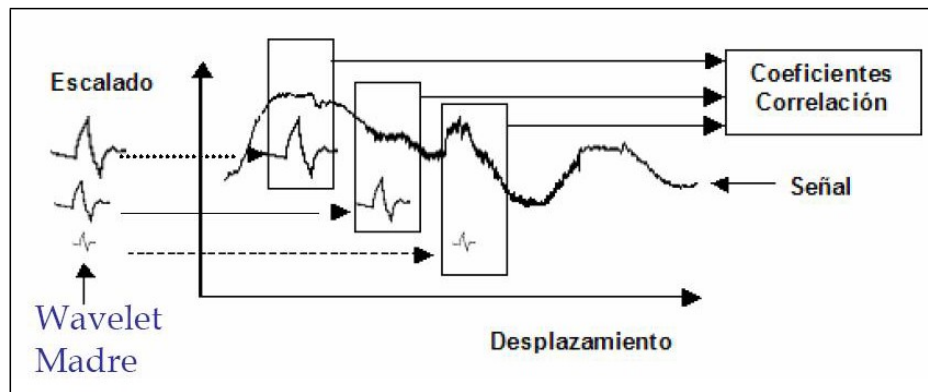


Figura 4.8.- Esquema de la aplicación de la Transformada Wavelet. [T4]

Para el caso de la TWC, la señal  $f(t)$  puede ser reconstruida aplicando la ecuación, que representa la Transformada Inversa de la Wavelet Continua, bajo ciertos criterios de admisibilidad dados por la ecuación:

$$f(t) = \frac{1}{K^2} \iint CWT(a, b) \frac{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)}{a^2} \cdot da \cdot db$$

Donde K es una constante determinada por el tipo de Wavelet que se ha utilizado en la transformación, la cual se conoce como constante de admisibilidad y se define como:

$$K = \sqrt{2\pi \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|H(w)|^2}{|w|} dw} < \infty$$

Siendo  $H(w)$  la Transformada de Fourier de  $\psi(t)$ .



En la figura se ilustra la Transformada Wavelet Continua de una señal.

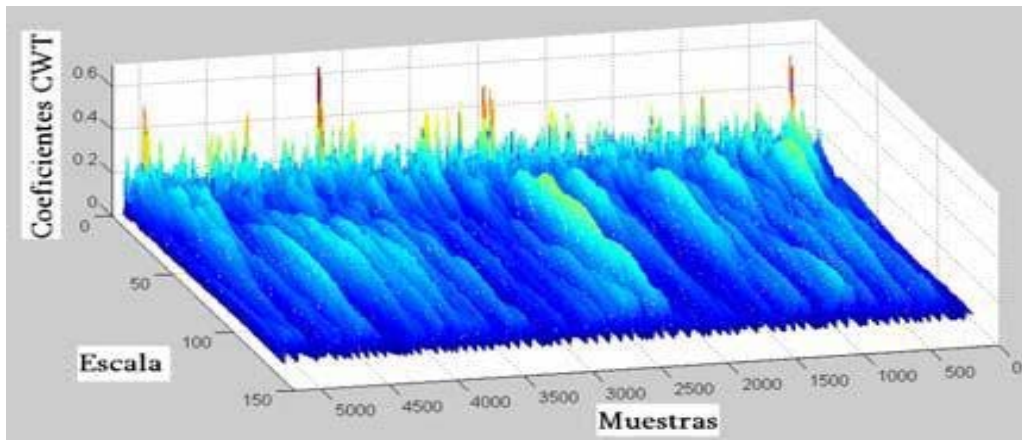


Figura 4.9.- Procesamiento de una señal vibratoria, TWC. [P5]

Es posible visualizar que la TWC ofrece una gran cantidad de información en tres dimensiones. En la ilustración vemos cómo trabaja la TWC, así como sus variables a partir de una señal sinusoidal de frecuencia variable.

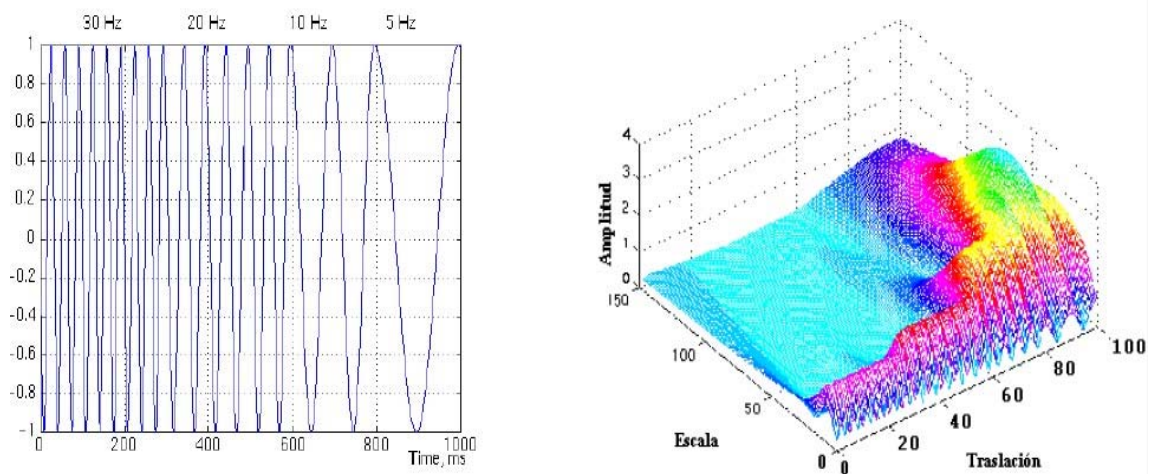


Figura 4.10.- Señal sinusoidal y su transformada wavelet. [P4]



**3.2. TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA (TWD)**

El cálculo de la TWC constituye un proceso numérico bastante complejo, y resulta evidente que no puede realizarse fácilmente de manera práctica. Para evitar este cálculo, Croiser dio los primeros pasos con una técnica distinta, más interesante a nivel práctico, denominada Transformada Discreta Wavelet (TWD).

La TWD se basa en la discretización de los parámetros de escala y de tiempo de la TWC, lo que facilita la implementación práctica del Análisis Wavelet, al mejorar el tiempo de procesamiento de datos, sin descuidar la calidad de la información que proporciona.

La función Wavelet Continua  $\Psi_{a,b}(t)$  de la ecuación, se transforma en la función Wavelet Discreta  $\Psi_{j,k}(n)$ , como muestra la ecuación:

$$\psi_{j,k}(n) = a^{-\frac{j}{2}} \cdot \psi(a^{-j}n - kb)$$

Los parámetros  $a$  y  $b$  se definen según la escala diádica, tal como indican las ecuaciones siguientes, donde  $j$  es el nivel de descomposición y  $k$  es el factor de traslación.

$$a = 2^j; b = k 2^j \quad a > 0; b > 1 \quad (j, k) \in \mathbb{R}^2$$

De esta manera, sea la señal a analizar  $f(n)$  una función discreta, la Transformada Wavelet Discreta de esta señal viene dada por la ecuación:

$$TWD_n(j, k) = a^{-1/2} \int f(n) \psi(a^{-j}n - kb) dn$$

Para reconstruir la señal  $f(n)$  a partir de los coeficientes de la señal transformada  $DWT_n$ , debe existir la condición de estabilidad planteada por la ecuación:

$$A \|f(n)\|^2 \leq \frac{2}{A+B} \sum_j \sum_k |DWT_n|^2 \leq B \|f(n)\|^2 \quad A > 0; B < \infty$$

Entonces, la fórmula de reconstrucción está dada por la ecuación:

$$f(n) \approx \frac{2}{A+B} \sum_j \sum_k DWT_n \psi_{j,k}(n)$$

Cuanto más cercanos sean los valores de A y B, la reconstrucción de la señal es más precisa. En el caso de  $A=B=1$ , entonces la familia de Wavelets es ortonormal.

Una de las últimas variantes de la DWT es el Análisis Multirresolución (MRA), que utiliza filtros digitales recursivos para optimizar el proceso de cálculo, generando información por bandas de frecuencia.

### 3.3. TRANSFORMADA WAVELET ESTACIONARIA (TWE)

La Transformada Wavelet Estacionaria (TWE) se puede obtener modificando el esquema básico de la Transformada Wavelet Discreta (TWD).

Se aplican los dos filtros para producir a la salida dos secuencias en cada nivel. Debido a que no se hace decimación, se obtienen, a la salida de cada nivel, secuencias de longitud igual a la señal original. Pero se modifican los filtros en cada nivel agregándole ceros.

Para explicar el procedimiento se introduce el operador  $\uparrow 2$ , este operador alterna una secuencia con ceros; por ejemplo, si  $Y=\uparrow 2(x)$  entonces  $Y_{2i}=x_i$ , y  $Y_{2i+1}=0$ . Los filtros g y h para cada nivel de descomposición se calculan en la ecuación:

$$\begin{aligned} g_{j+1} &= \uparrow 2(g_j) \\ h_{j+1} &= \uparrow 2(h_j) \end{aligned}$$

Donde  $h_0$  y  $g_0$  son los filtros originales utilizados en la TWD. En la figura se puede observar el esquema análisis de la TWE.

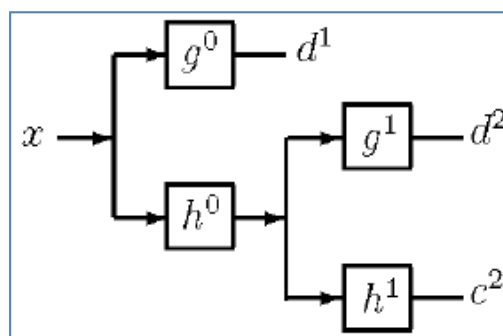


Figura 4.11.- Transformada Wavelet Estacionaria con dos niveles de descomposición. [P5]

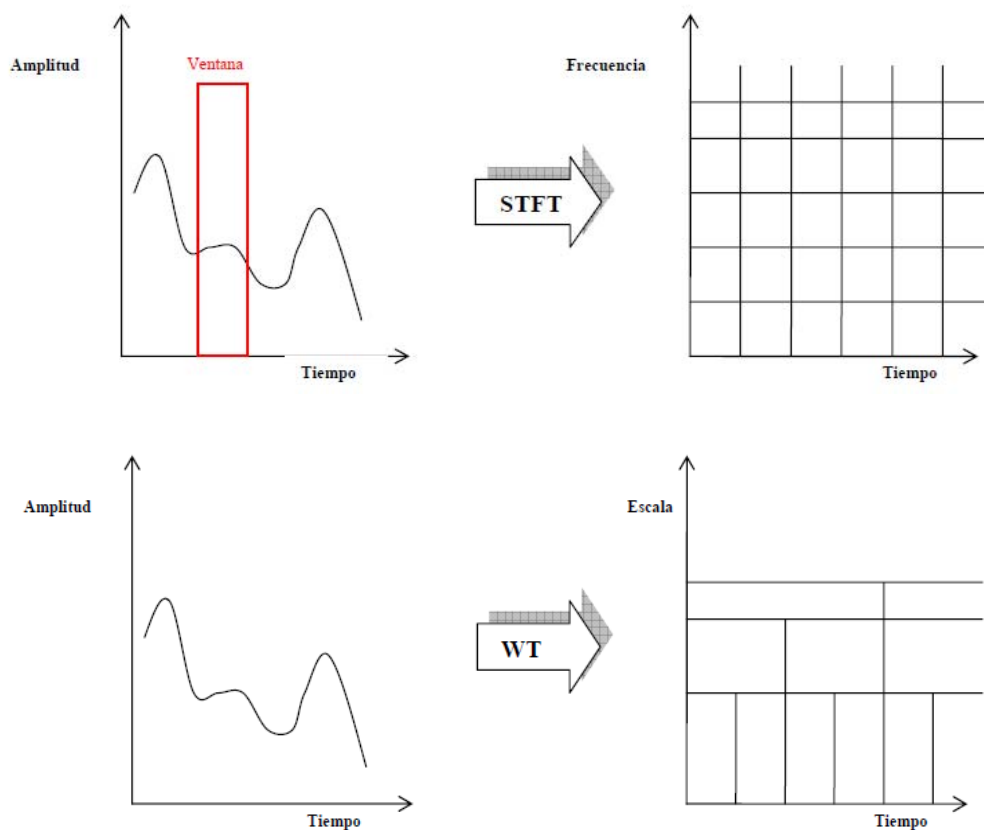
Los coeficientes “d” de la TWE a diferencia de la TWD tienen una cantidad igual a la longitud de la señal analizada. Esta última característica permite realizar la detección de cambios abruptos sobre los coeficientes de las diferentes escalas.

#### **4. EL ANÁLISIS MULTIRRESOLUCIÓN (MRA)**

De lo anterior surge un concepto importante que es el Análisis Multirresolución (MRA) que, como dice su propio nombre es un análisis de la señal a estudiar de tal modo que cada componente de frecuencia es analizado con una resolución diferente.

A finales de la década de los ochenta, el Ingeniero francés Stephane Mallat dio un nuevo impulso a las Wavelets con su trabajo acerca de procesamiento digital de señales que permitió construir un grupo de funciones base ortonormales, diferenciables y con soporte compacto para las transformadas Wavelet, lo supuso su popularización en el campo de la Ingeniería.

Esto es una alternativa más sobre la STFT que analiza todas las componentes de frecuencia a una misma resolución dada (todas las ventanas tienen las mismas dimensiones). En general, las ventajas que ofrece este método es que, con el uso de wavelets, a altas frecuencias se tiene una buena resolución en tiempo y poca resolución en frecuencia, mientras que para bajas frecuencias los resultados son buena resolución en frecuencia y poca resolución en tiempo.



**Figura 4.12.- Comparación de la ventana de transformación de una STFT y una WT. [P4]**

Vamos a ver dos maneras de afrontar el análisis: la descomposición Wavelet, y los Paquetes Wavelet:

### 1. DESCOMPOSICIÓN WAVELET

El análisis y síntesis de la Descomposición Wavelet se realiza por medio de una serie de filtros paso alto y filtros paso bajo. De este modo se van obteniendo las muestras de bajas y altas frecuencias. Este proceso, puede representarse a través del diagrama:

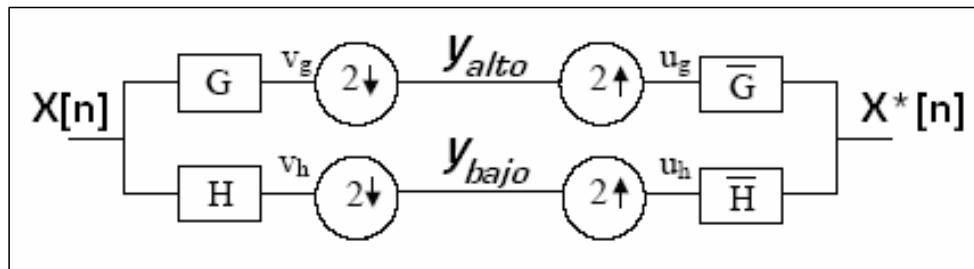


Figura 4.13.- Banco de filtros de dos canales. [T4]

Siendo  $X[n]$  la señal original,  $V_g$  y  $V_h$  son las salidas de los filtros de media banda sin submuestrear, es decir, con el mismo número de muestras que el nivel anterior de descomposición. Para el proceso de síntesis,  $U_g$  y  $U_h$  representan los coeficientes Wavelet sobremuestreados, que producen la señal reconstruida  $X^*[n]$ .

El primer paso de la Descomposición Wavelet de una señal discreta  $X[n]$  con un ancho de banda de  $0-\pi$  rad/s y  $N$  número de muestras, consiste en la aplicación de dos filtros de media banda, el primero de paso alto con respuesta de impulso  $g[n]$ , y el segundo de paso bajo con respuesta de impulso  $h[n]$ . Tras del proceso de filtrado, se obtiene el mismo número de muestras de  $X[n]$  en las dos señales resultantes, aunque con la mitad de banda de frecuencia. Aplicando la regla de Nyquist, se justifica eliminar la mitad de las muestras sin pérdida de información relevante, tomando una de cada dos muestras consecutivas. Este procedimiento constituye el primer nivel de descomposición (nivel 1), y se puede expresar matemáticamente para todas las descomposiciones, en las ecuaciones que se muestran a continuación:

$$Dc[k] = y_{alto}[k] = \sum_n X[n] g[2k - n]$$

$$Ac[k] = y_{bajo}[k] = \sum_n X[n] h[2k - n]$$

Donde  $y_{\text{alto}}$  ó  $D_c$  representa la salida del filtro de paso alto (g), que son los denominados coeficientes de detalle, e  $y_{\text{bajo}}$  ó  $A_c$  representa la salida del filtro de paso bajo (h), denominada coeficientes de aproximación. El término  $k$  representa el nivel de descomposición y  $2k$  determina el submuestreo por un factor de dos. Ambas salidas conforman los Coeficientes de la Descomposición Wavelet, para el nivel de análisis correspondiente.

Para alcanzar niveles superiores de descomposición, se repite el procedimiento de filtrado y submuestreo para la señal de salida del filtro de paso bajo (el nivel de aproximación). En general, para cada nivel superior, corresponde la mitad del número de muestras anterior.

Este proceso se ilustra en la figura 4.14.

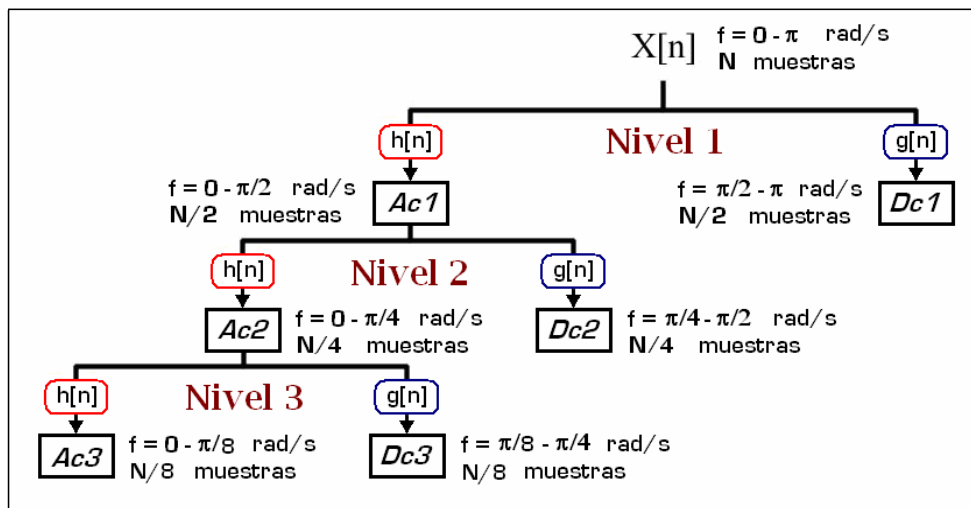


Figura 4.14.- Esquema del MRA que genera la Descomposición Wavelet. [T4]

Todo este proceso puede hacerse reversible mediante la siguiente síntesis, representada en la ecuación:

$$X[n] = \sum_{k=1}^{\infty} D_c[k] g(2k - n) + A_c[k] h(2k - n)$$

La ecuación implica la suma de los coeficientes de detalle de la descomposición (a todos los niveles), multiplicados por el filtro de paso alto  $g[n]$ , y los coeficientes de aproximación del último nivel de descomposición multiplicados por el filtro de paso bajo  $h[n]$ .

## 2. PAQUETES WAVELET

La Transformada de Paquetes Wavelet (WP) es otra técnica, extensión del MRA de Mallat.

En el procedimiento de Descomposición Wavelet, cada nivel de descomposición genera una información de detalle y otra de aproximación; sin embargo, la información de detalle no se vuelve a analizar, debido a que los niveles siguientes de descomposición, siempre parten de la información de aproximación.

En el caso de los Paquetes Wavelet, el procedimiento de descomposición es prácticamente idéntico, con la única diferencia de que la información de detalle también genera información en niveles posteriores de descomposición; es decir, cada descomposición pasa a ser la raíz de un nuevo árbol de descomposición. Tal procedimiento se ilustra en la figura 4.15.

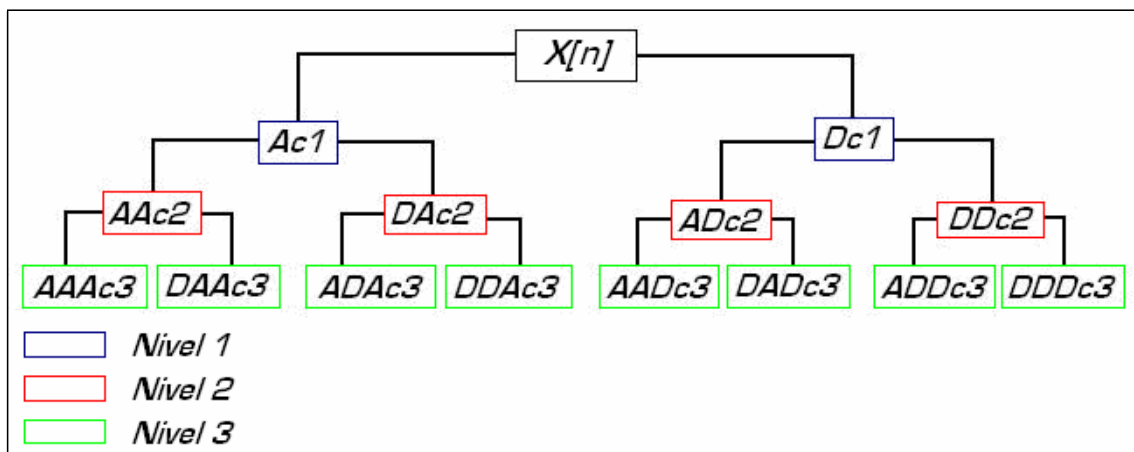


Figura 4.15.- Diagrama de descomposición por paquetes Wavelets. [T4]

Donde:

$Ac1$ =Coeficientes de Aproximación del Nivel 1.

$Dc1$ =Coeficientes de Detalle del Nivel 1.

$AAc2$ =Coeficientes de Aproximación de  $Ac1$ , correspondientes al Nivel 2.

$DAc2$ =Coeficientes de Detalle de  $Ac1$ , correspondientes al Nivel 2.

$ADc2$ =Coeficientes de Aproximación de  $Dc1$ , correspondientes al Nivel 2.

$DDc2$ =Coeficientes de Detalle de  $Dc1$ , correspondientes al Nivel 2.



AAAc3=Coeficientes de Aproximación de AAc2, correspondientes al Nivel 3.

DAAc3=Coeficientes de Detalle de AAc2, correspondientes al Nivel 3.

ADAc3=Coeficientes de Aproximación de DAc2, correspondientes al Nivel 3.

DDAc3=Coeficientes de Detalle de DAc2, correspondientes al Nivel 3.

AADc3=Coeficientes de Aproximación de ADc2, correspondientes al Nivel 3.

DADc3=Coeficientes de Detalle de ADc2, correspondientes al Nivel 3.

ADDc3=Coeficientes de Aproximación de DDc2, correspondientes al Nivel 3.

DDDc3=Coeficientes de Detalle de DDc2, correspondientes al Nivel 3.

Las ecuaciones que gobiernan el proceso de análisis por medio de filtros, siguen siendo las mismas ecuaciones correspondientes al MRA, aunque pueden existir distintos coeficientes de detalle y coeficientes de aproximación para un nivel determinado, por lo que la nomenclatura resulta más compleja.

Considerando que la señal discreta  $X[n]$  es la misma del apartado anterior, con un ancho de banda de  $(0-\pi \text{ rad/s})$  y  $N$  número de muestras, las bandas de frecuencia correspondientes a cada una de las descomposiciones, son las mostradas en la Tabla.

Descomposición	Nivel	Número de muestras	Banda de frecuencia (rad/s)
$Ac1$	1	$N/2$	$0-\pi/2$
$Dc1$	1	$N/2$	$\pi/2-\pi$
$AAc2$	2	$N/4$	$0-\pi/4$
$DAc2$	2	$N/4$	$\pi/4-\pi/2$
$ADc2$	2	$N/4$	$\pi/2-3\pi/4$
$DDc2$	2	$N/4$	$3\pi/4-\pi$
$AAAc3$	3	$N/8$	$0-\pi/8$
$DAAc3$	3	$N/8$	$\pi/8-\pi/4$
$ADAc3$	3	$N/8$	$\pi/4-3\pi/8$
$DDAc3$	3	$N/8$	$3\pi/8-\pi/2$
$AADc3$	3	$N/8$	$\pi/2-5\pi/8$
$DADc3$	3	$N/8$	$5\pi/8-3\pi/4$
$ADDc3$	3	$N/8$	$3\pi/4-7\pi/8$
$DDDc3$	3	$N/8$	$7\pi/8-\pi$

Tabla 4.1.- Bandas de frecuencia de la Descomposición WP para la señal  $X[n]$ .

Para los Paquetes Wavelet, el proceso de síntesis varía (el total de ancho de banda de la señal está repartido en mayor  $N^\circ$  de coeficientes), y la reconstrucción se puede realizar mediante la siguiente ecuación, en donde sólo se introduce información del último nivel de descomposición.

$$X[n] = \sum_k D_c[k] g(2k - n) + \sum_k A_c[k] h(2k - n)$$



## **5. SISTEMAS CLASIFICADORES INTELIGENTES**

La tarea de un Sistema Clasificador Inteligente es utilizar los patrones de un conjunto de muestras, para asignar una clase a todos los objetos que se desee analizar posteriormente, de acuerdo a sus diferencias o similitudes.

Este proceso puede verse como una actividad en dos etapas: la primera consiste en el aprendizaje de propiedades del grupo de muestras que caracterizan una clase (patrones); en la segunda se decide si un nuevo objeto es un posible miembro de tal clase, observando si éste tiene propiedades comunes a aquellas del grupo de muestras.

El reconocimiento de patrones (PR) es una actividad inconsciente que los seres humanos realizamos con total naturalidad: recibimos información a través de nuestros sentidos, la procesamos inmediatamente en nuestro cerebro, y casi al instante somos capaces de identificar la fuente de información. De hecho, la mayoría de nuestras tareas diarias están basadas en el éxito de realizar distintas actividades de reconocimiento de patrones: cuando leemos, reconocemos los caracteres, palabras, y luego conceptos y nociones de la señal visual que recibe nuestro cerebro. El PR es el acto de ejecutar una acción, basados en las características de la información percibida.

La capacidad humana de reconocer patrones se basa en experiencias anteriores, aunque es realmente complejo descifrar la forma en la cual el cerebro ejecuta tal acción; por tanto, es obvio que el aprendizaje resulta ser una parte indispensable del proceso de PR, tanto en humanos, como en sistemas artificiales. Nos podemos encontrar con:

- Aprendizaje supervisado: se realiza con la ayuda de un “Profesor”, el cual es un agente externo que proporciona un etiquetado de los patrones, o lo que es lo mismo, que informa al sistema la relación entre los patrones existentes y las clases a las cuales pertenecen.
- Aprendizaje no supervisado: los patrones disponibles no están etiquetados; y por tanto es necesario que el clasificador descubra los grupos naturales del conjunto de las muestras de entrenamiento.

La motivación actual en este campo, es esencialmente el desarrollo de nuevos algoritmos y metodologías que sean capaces de implementar muchas de las tareas de PR (reconocimiento de patrones) que efectúan los humanos, y suplantarlos en tareas de PR que sean repetitivas o mecánicas, pero a nivel computacional, cada vez de manera más precisa y óptima, sin necesidad de un experto.





El campo de la Clasificación Inteligente ha sido un factor clave en el desarrollo de los métodos de diagnóstico de defectos, y ha madurado a lo largo de los años, debido al continuo aporte de ideas de disciplinas tales como: Neurobiología, Ciencias de la Informática, Psicología, Física, Ingeniería, Matemática y Ciencia Cognitiva, entre otras. Los sistemas de reconocimiento de voz, identificación de huellas dactilares, manejo de código de barras, entre otros, son utilizados ampliamente y representan la amplia utilidad de los sistemas de este tipo.

### EVOLUCIÓN Y TIPOS DE SISTEMAS CLASIFICADORES

A lo largo de la historia de la diagnosis de defectos en máquinas, se han desarrollado y utilizado distintos tipos de clasificadores artificiales. La evolución tuvo sus inicios en enfoques estadísticos clásicos de decisión (determinísticos y probabilísticos), enfoques sintácticos, árboles de decisión, hasta otros que se han desarrollado recientemente a través de paquetes informáticos, y que derivan de los anteriores, como enfoques teóricos de grupos borrosos, algoritmos genéticos y coneccionistas (ANN); incluyendo versiones híbridas de todos los mencionados anteriormente.

#### 1.- Enfoques Estadísticos

Durante los inicios del desarrollo del reconocimiento de patrones, muchos científicos pensaron que las teorías de estadísticas y probabilísticas eran herramientas ideales para tareas de clasificación. Estaba claro que la estadística podría ayudar a modelar la variabilidad de patrones en el espacio, a través de distribuciones de probabilidad multivariable.

El método clásico de *discriminantes lineales*, propuesto en primera instancia por Fisher, sugiere el uso de combinaciones lineales de los patrones, para maximizar la varianza entre grupos. Estas funciones, denominadas discriminantes, también se pueden construir utilizando otros enfoques, como mínimos cuadrados, programación lineal, entre otros. El procedimiento se basa en aproximar de manera óptima las fronteras entre clases, a través de la utilización de hiperplanos en el espacio p-dimensional de los patrones de diferentes clases, asumiendo que son linealmente separables.

La *teoría de la decisión de Bayes*, es esencialmente un procedimiento de clasificación paramétrica, que se utiliza para construir reglas de clasificación, y consiste en la asunción de un tipo específico de densidad de probabilidad para un vector característico. Además, también se asume una distribución de probabilidad para algún parámetro de interés, que en este caso, sería la etiqueta de la clase.



De igual manera, hay enfoques *no paramétricos* que se utilizan en situaciones en las que no existe suficiente información para asumir distribuciones del vector característico para las diferentes clases. Lo más usual es la utilización de estimadores de probabilidad no paramétricos, como el estimador de kernel, o estimadores de ventana. Otra forma, es utilizar reglas de clasificación basadas en la dimensión, como la regla del vecino más cercano ó la mínima distancia de clasificación.

Por último, el *agrupamiento* es una técnica que está ligada al aprendizaje no supervisado. Su objetivo es dividir toda la información disponible en un cierto número de subgrupos homogéneos donde los elementos de cada subgrupo son lo más similar posible, y lo más diferente posible de los otros subgrupos. Para este caso particular, el número de subgrupos puede preestablecerse, y existen muchos algoritmos capaces de realizar las tareas de clasificación, que por lo general, pertenecen a dos categorías: los algoritmos de partición, y los jerárquicos.

### **2.- Enfoques sintácticos**

Forman parte de los enfoques estructurales, y permiten la representación de patrones complejos en términos de una descomposición recursiva que genera subgrupos más simples de manera progresiva. El proceso es similar a la descomposición de oraciones en palabras, y luego en letras y vocales, con la utilización de reglas gramaticales válidas, en este caso, el lenguaje.

Este enfoque funciona muy bien en el caso de patrones ideales, pero se complica demasiado cuando se traslada a problemas de la vida real, en donde los patrones generalmente tienen cierta distorsión y ruido.

### **3.- Árboles de clasificación**

Esta técnica de clasificación ha sido muy popular en campos como la Biología y la Medicina, y tiene la ventaja de que facilita el entendimiento del proceso de clasificación.

Los árboles de clasificación son sistemas de decisión de etapas múltiples, en los cuales una muestra es rechazada de manera secuencial, hasta que logra ser ubicada en una clase específica. Para conseguir esto, el clasificador divide el espacio en varios sub-árboles correspondientes al número de clases. Con la llegada del vector característico, el clasificador realiza una secuencia de decisiones a través de una ruta de nodos, hasta que encuentra la clase que se ajusta a tal vector. Por lo general, poseen una estructura binaria, donde cada nodo genera otros dos. Las variantes de este clasificador dependen del método que se utilice para dividir nodos y para descartar sub-árboles.



Este esquema ofrece ciertas ventajas para problemas de clasificación con un gran número de clases, sin embargo, su principal desventaja es su alta varianza, debido a que la estructura de los árboles de clasificación es muy sensible a las pequeñas diferencias en el conjunto de muestras de entrenamiento. Además, arrastran un error significativo de los nodos superiores a los inferiores, y se ha demostrado por estudios comparativos, que logran tasas de clasificación inferiores a diferentes tipos de redes neuronales, aunque necesitan un menor tiempo de entrenamiento.

#### **4.- Enfoques teóricos de grupos borrosos**

En el año 1967, Zadeh propuso una técnica novedosa para modelar la imprecisión por medio de *grupos borrosos*, los cuales son generalizaciones de grupos convencionales. Esta teoría plantea la idea de que una muestra pertenece en cierto grado a un conjunto dado, buscando una solución que parte de un espacio muy amplio, sujeto a pocas restricciones, y que permite a los algoritmos una mayor libertad para evitar errores de clasificación, al no forzar una solución abrupta por imposición a niveles intermedios.

El inconveniente principal es la dificultad de elegir una correcta función de pertenencia para los conjuntos difusos, ya que si cualquier función de pertenencia del sistema estuviese mal especificada, probablemente haría fallar a todo el sistema completo.

#### **5.- Algoritmos genéticos (GA)**

Los algoritmos genéticos fueron inventados por John Holland en el año 1975, y consisten en la optimización de una función objetivo. Los GA llevan a cabo una búsqueda en el espacio de soluciones, intentando encontrar la solución que minimiza dicha función objetivo. Por este motivo, los GA pueden resolver problemas que se expresen como un problema de optimización.

Básicamente, los algoritmos genéticos funcionan de la siguiente manera: dada una población de soluciones, y en base al valor de la función objetivo para cada una de los individuos (soluciones) de esa población, se seleccionan los mejores individuos (los que minimizan la función objetivo) y se combinan para generar otros nuevos. Este proceso se repite cíclicamente hasta la convergencia del algoritmo.

El proceso es similar al que se produce en la naturaleza, en donde una serie de individuos compiten por su supervivencia, y los mejor adaptados al medio (los que optimizan la función objetivo) sobreviven y tienen más posibilidades de aparearse. De esta manera, generación tras generación, la especie consigue una mayor y mejor adaptación al medio en el que vive.



Las limitaciones de esta técnica son esencialmente la *convergencia*, que depende en cierta medida de los parámetros que se utilicen (tamaño de la población, número de generaciones,...) y que el *lenguaje utilizado* para especificar soluciones candidatas debe ser robusto; es decir, el algoritmo debe ser capaz de tolerar cambios aleatorios que no produzcan constantemente errores fatales o resultados sin sentido.

#### **6.- Enfoques conexionistas**

Comprenden la utilización de Redes Neuronales Artificiales (ANN), las cuales contribuyen al proceso de clasificación de patrones utilizando la relación existente entre un grupo de patrones y las clases de defectos, sin modelar el estado de los procesos internos, ni la estructura de manera explícita. Los modelos conexionistas, tratan de imitar la forma en la que el cerebro aprende a procesar la información. Su elaboración supone, en primer lugar, la deducción de los rasgos o características esenciales de las neuronas y sus conexiones, y en segundo lugar, la implementación del modelo en una computadora, de forma que se pueda simular. Es obvio decir que estos modelos son idealizaciones burdas de las auténticas neuronas naturales, pero que sin embargo resultan interesantes, cuando menos, por sus capacidades de aprendizaje.

A pesar de su popularización, por lo general, las redes neuronales son utilizadas de manera muy superficial, y no se distingue a simple vista la diferencia entre la utilización de las distintas configuraciones existentes. Las características de diseño de las redes neuronales se suelen estandarizar para distintas aplicaciones, y este acto constituye un obstáculo para la optimización de la tarea de clasificación.



## **6. REDES NEURONALES ARTIFICIALES (RNA'S)**

Existen algunos problemas en el campo de la ingeniería, para los cuales la búsqueda de una solución exacta requiere una cantidad de recursos prácticamente imposibles, y por lo cual, sólo se encuentra en la práctica una solución aceptable. Las Redes Neuronales Artificiales (RNA ó ANN), pueden ofrecer buenas soluciones a esa clase de problemas. Entre sus aplicaciones industriales más comunes se encuentran: identificación y modelado, optimización, clasificación, control de procesos y reconocimiento de patrones.

“Se puede definir una red neuronal como un sistema de procesamiento masivo de información, consistente en un gran número de procesadores simples con múltiples conexiones entre ellos.”

Desde mediados de la década de los noventa se han sucedido los estudios sobre clasificadores basados en redes neuronales. Se ha aplicado en numerosos campos y en la mayoría va acompañado de un procesamiento de la señal previo a la clasificación para mejorar su exactitud.

Cabe destacar su uso en los siguientes campos: [P4]

- **Ámbito empresarial:** reconocimiento de caracteres escritos, optimización de plazas y horarios en líneas de vuelo, identificación de candidatos para posiciones específicas.
- **Medicina:** analizadores del habla para sistemas de audición de sordos profundos, diagnóstico y tratamiento a partir de síntomas y/o de datos analíticos (encefalograma, etc.), monitorización en cirugía, predicción de reacciones adversas a los medicamentos.
- **Militares:** clasificación de las señales de radar, creación de armas inteligentes, optimización del uso de recursos escasos.
- **Medio Ambiente:** previsión del tiempo, detección de sismos, patrones de migración.
- **Manufacturación:** control de la calidad, control de producción, robots con visión artificial, mejoras en el mantenimiento predictivo (detección temprana de defectos).
- **Finanzas:** previsión de la evolución de los precios, valoración del riesgo de los créditos, identificación de falsificaciones.

Al abordar el diseño e implantación de una red neuronal se debería tener en cuenta:

- Los datos que se presentan a la red para su entrenamiento deberán contener la máxima información posible, y cubrir un amplio espectro de casos dentro del universo a tratar. Los datos no deberán estar sesgados hacia una determinada zona. Dichos datos deben presentarse de forma aleatoria sin seguir ningún patrón de entrada.” (Le Cun)
- Es conveniente que los valores de entrada sean normalizados en el intervalo (0,1)
- Cuando la topología de la red contemple el uso de diferentes ratios de aprendizaje (Learning Rate) para cada capa, se asignarán valores más bajos de este ratio en las capas finales que en las iniciales.
- Según la complejidad del sistema, se deberá probar en principio con una sola capa oculta; en caso de no obtener resultados óptimos, se probarán con dos (Funahasi).

Las ANN tienen su origen en la simulación abstracta de los sistemas nerviosos biológicos. La primera red neuronal fue propuesta en 1943 por McCulloch y Pitts, en términos de un modelo computacional de "actividad nerviosa", que consistía en un modelo binario, formado por un conjunto de unidades llamadas "neuronas" conectadas entre sí, en el cual cada neurona tiene un umbral preestablecido. Tales conexiones tienen una gran semejanza con las *dendritas* y los *axones* de los sistemas nerviosos biológicos.

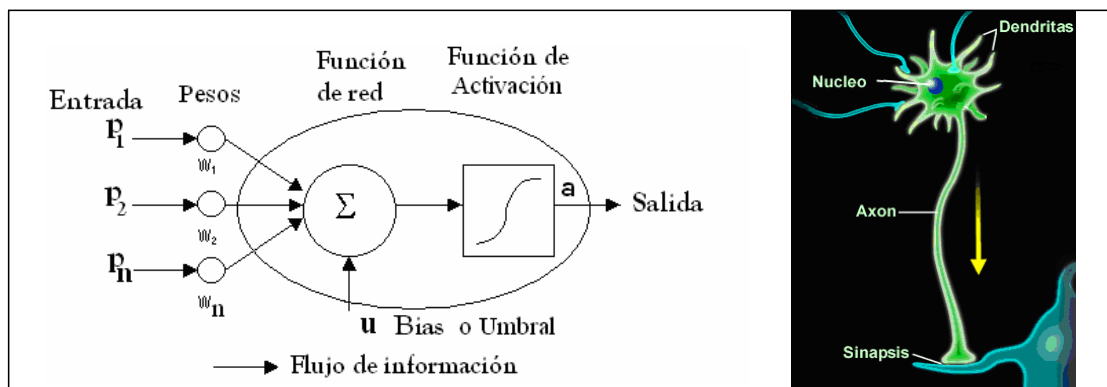


Figura 4.16.- Neurona Artificial y Neurona real.

Si comparamos una neurona real con una artificial como en la figura 4.16, observamos que disponen la misma configuración: un cuerpo al que le llega información del resto de neuronas por las dendritas (entrada) y que envía información a otras por el axón (salida).

Este primer modelo sirvió de ejemplo para los modelos posteriores de Hebb, quien propuso un mecanismo de aprendizaje de las neuronas. Rosenblatt, realizó la primera aplicación práctica a principios de la década de los 50, y aproximadamente al mismo tiempo, Widrow propuso un nuevo algoritmo de entrenamiento de ANN, denominado regla Widrow-Hoff, que se sigue utilizando en la actualidad. Por otra parte, Minsky advirtió de las limitaciones de los modelos de Rosenblatt y Widrow para el entrenamiento de redes complejas, e influenciaron a otros investigadores a desarrollar nuevas teorías. En este sentido, Kohonen propuso una matriz de correlación para memoria asociativa, Grossberg desarrolló nuevas teorías de Redes Autoorganizadas, formulando las bases de la Teoría de la Resonancia Adaptativa (ART), y Hopfield propuso las redes recurrentes.

El estudio de las redes neuronales artificiales forma parte de una rama que se engloba dentro del campo de la inteligencia artificial. Dicha rama se dedica al estudio y desarrollo de simulaciones de los elementos inteligentes de la naturaleza (cerebros) con el fin de que, de forma espontánea, estas simulaciones (redes neuronales) se comporten de forma inteligente.

## 1. ELEMENTOS BÁSICOS QUE COMPONEN UNA RED NEURONAL

Una red neuronal típica está compuesta por múltiples neuronas, que a su vez se componen de una función de entrada o de base, una función de activación y una función de salida, como muestra la ilustración.

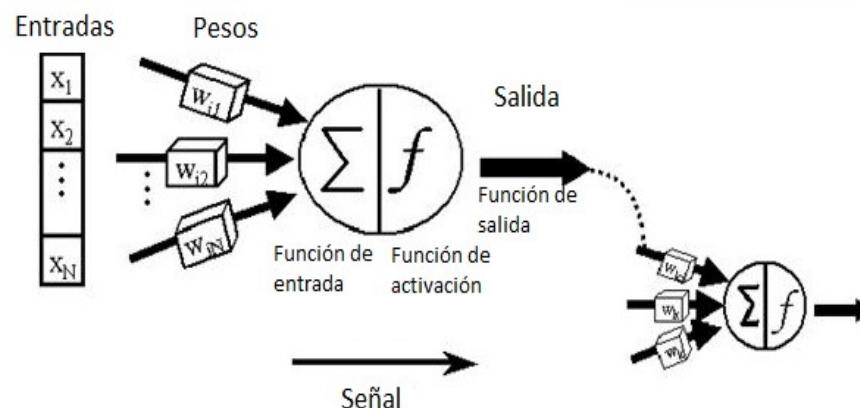


Figura 4.17.- Estructura básica de una neurona.



Las partes fundamentales de una neurona artificial básica, se observan en la figura, y son:

**Pesos:** Son valores que se asocian a cada una de las conexiones entre neuronas de una red. La variación de éstos determina el aprendizaje de una red.

Cada nodo, suministra un valor  $y_j$  a su salida. Este valor se propaga a través de la red mediante conexiones hacia otros nodos de la red. Asociada a cada conexión hay un peso sináptico denominado  $w_{ij}$ , que determina el efecto del nodo  $j$ -ésimo sobre el nodo  $i$ -ésimo. Las entradas al nodo  $i$ -ésimo que provienen de los otros nodos son acumulados junto con el valor umbral  $\theta_i$ , y se aplica la función base  $f$ , obteniendo  $u_i$ .

**Entrada:** Es el vector que excita a la neurona. Se compone de aquellos datos más representativos (patrones) del fenómeno al que se desea aplicar una ANN.

Las principales funciones de entrada que podemos encontrar en una red neuronal artificial son:

- Sumatoria:

$$u_i(w, x) = \sum_{j=1}^n w_{ij} x_j$$

- Productoria:

$$u_i(w, x) = \prod_{j=1}^n w_{ij} x_j$$

- Máximo:

$$u_i(w, x) = \text{Max}(w_{ij} x_j)$$

- Hiperesférica:

$$u_i(w, x) = \sqrt{\sum_{j=1}^n (w_{ij} - x_j)^2}$$



**Función de activación:** Al igual que en biología, una neurona puede encontrarse en un estado de excitación (activa) o de no excitación (inactiva). La función de activación se encarga de calcular el nivel o estado de activación de la neurona en función de la entrada total.

Es la característica principal de las neuronas y la que mejor define el comportamiento de la misma. En distintos modelos de ANN, han sido propuestas diferentes funciones de activación. Las más populares están presentes en la Tabla 4.2.


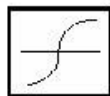
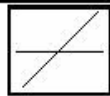
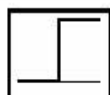

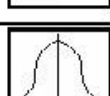
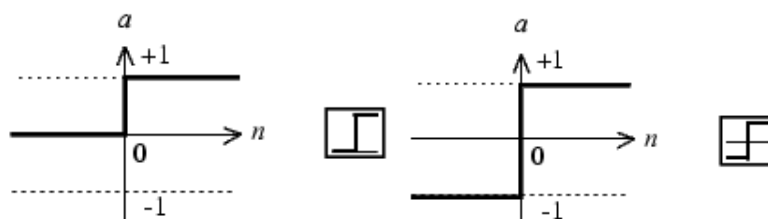
Funciones de transferencia	Fórmula	Representación Gráfica
Sigmoide Logarítmico	$f(n) = \frac{1}{1 + e^{-n}}$	
Sigmoide de Tangente Hiperbólica	$f(n) = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}}$	
Lineal	$f(n) = n$	
Escalón	$f(n) = \begin{cases} 1 & n \geq 0 \\ 0 & n < 0 \end{cases}$	
Escalón Simétrico	$f(n) = \begin{cases} 1 & n \geq 0 \\ -1 & n < 0 \end{cases}$	
Base Radial Gaussiana®	$f(n) = \exp\left[-\ n - c\ ^2 / d\right]$	
Competitiva	$f(n) = \begin{cases} 1 & \text{neurona con } \max(n) \\ 0 & \text{todas las demás neuronas} \end{cases}$	-

Tabla 4.2.- Resumen de las funciones de activación más utilizadas. [T4, 31]

**Función de salida:** Es el valor de salida de la neurona en función de la activación de la misma. En el caso de la utilización de una ANN para el proceso de diagnóstico de fallos, la salida equivale al Diagnóstico de la red. La función de salida determina que valor se transfiere a las neuronas vinculadas. Si la función de activación está por debajo de un umbral determinado, ninguna salida se pasa a la neurona subsiguiente. Normalmente, no cualquier valor es permitido como una entrada para una neurona, por lo tanto, los valores de salida están comprendidos en el rango [0, 1] o [-1,1].

Las funciones de salida más comunes son:

- Ninguna: La salida es la misma que la entrada.
- Binaria: Puede ser de la forma  $[0, 1]$  o  $[-1, 1]$ .



**Función de red o de propagación:** Calcula el valor de base o entrada total a la unidad. Equivale a la combinación de las señales que excitan o inhiben a las neuronas biológicas. Las funciones de red más utilizadas se presentan en la Tabla 2.4

Funciones de red	Comentarios	Fórmula
Lineal (con bias)	Función de red mas utilizada	$n = \sum_{j=1}^R w_j p_j + b$
De segundo orden	$n_i$ es una combinación lineal de polinomios de orden superior de la variable de entrada	$n = \sum_{j=1}^R \sum_{k=1}^R w_{jk} p_j p_k + b$
Delta ( $\Sigma - \Pi$ )	Poco común	$n = \prod_{j=1}^R w_j p_j$

Tabla 4.3.- Resumen de las funciones de red más utilizadas en ANN.

La función lineal, la más usada, transmite la entrada ( $p$ ) a través de una conexión, multiplicándola por su peso correspondiente ( $w$ ), formando el producto  $wp$ , que también es un escalar. Luego, a este producto se le añade otro elemento constitutivo, denominado bias o umbral ( $b$ ), para completar la suma ( $wp+b$ ), que será el argumento de la función de activación ( $f$ ), la cual produce la salida escalar  $n$ .  $j$  es cada uno de los componentes del vector de entrada.

## 2. NIVELES O CAPAS DE UNA RED NEURONAL

La distribución de neuronas dentro de la red se realiza formando niveles o capas, con un número determinado de dichas neuronas en cada una de ellas. Las ANN básicas tienen al menos tres capas de neuronas, y cada capa contiene un grupo de unidades de procesamiento, llamadas nodos o neuronas, que envían su propia salida a todos los nodos de la capa siguiente de manera unidireccional. A partir de su situación dentro de la red, se pueden distinguir tres tipos de capas:

- De entrada: es la capa que recibe directamente la información proveniente de las fuentes externas de la red, y sirven de interfaz entre esta información del mundo exterior y las unidades de proceso internas.
- Ocultas: son internas a la red y no tienen contacto directo con el entorno exterior. El número de niveles ocultos puede estar entre cero y un número elevado. Las neuronas de las capas ocultas pueden estar interconectadas de distintas maneras, lo que determina, junto con su número, las distintas topologías de redes neuronales.
- De salidas: transfieren información de la red hacia el exterior, como una interfaz entre las unidades internas de la red y el mundo exterior.

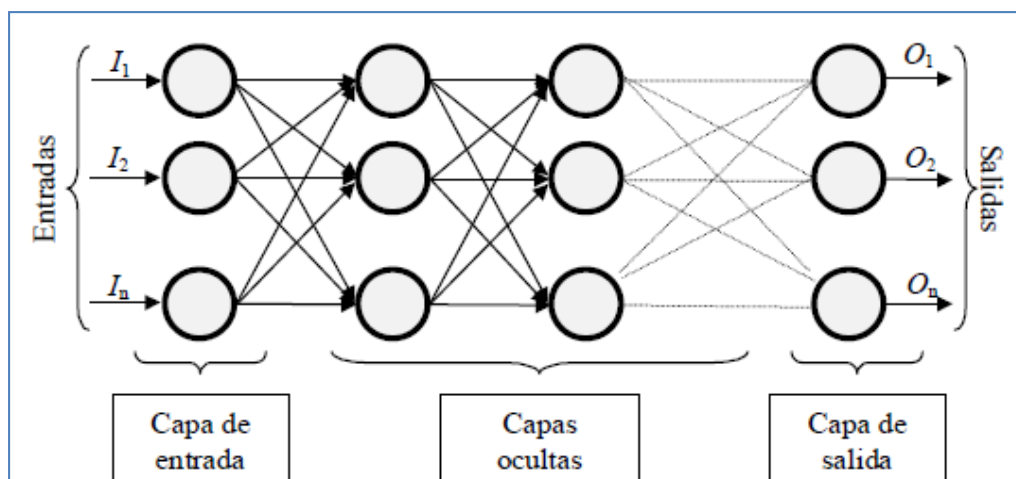


Figura 4.18.- Red neuronal típica de tres capas.

### 3. MECANISMOS DE APRENDIZAJE

Existen dos fases en la utilización de una ANN convencional: la fase de **aprendizaje** o **entrenamiento** y la fase de **prueba**. Una porción de la información de entrada se utiliza para entrenar la red, mientras que la otra porción restante, es utilizada para la fase de prueba.

Las ANN son sistemas de aprendizaje basados en ejemplos. La fase de **aprendizaje** consiste en una adaptación progresiva de los valores internos de la red, hasta obtener el comportamiento deseado. En la fase de **prueba**, no se alteran los valores de los pesos, o conexiones internas de la red, y su objetivo principal es verificar el comportamiento de datos desconocidos para la red. Esta fase es la que mide el éxito real del modelo.

El proceso de entrenamiento de una ANN para la diagnosis de fallos, se representa en la figura 4.19.

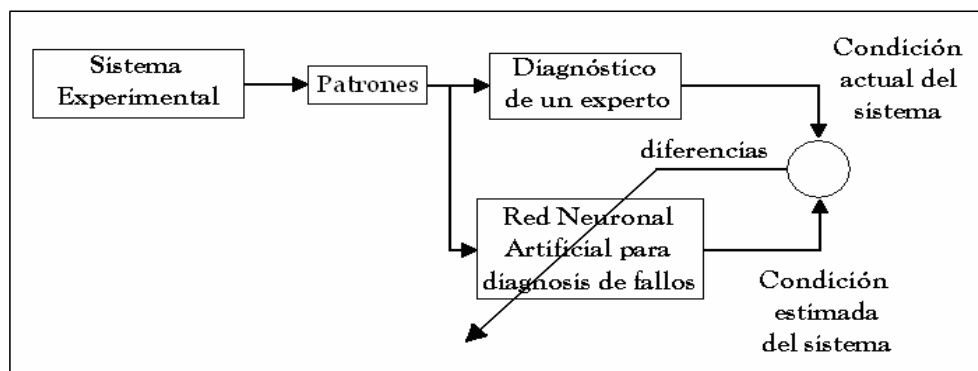


Figura 4.19.- Diagrama esquemático del entrenamiento supervisado de una ANN.

Al comienzo del proceso, la salida (diagnosis del defecto hecha por la ANN) no será correcta, ya que se genera un error que consiste en la diferencia que tiene con la decisión correcta que conoce el experto. Posteriormente, la red ajusta los parámetros internos para lograr una salida más cercana a la decisión correcta en la próxima iteración.

La capacidad de una red para resolver un problema está ligada de forma fundamental al tipo de ejemplos disponible en el proceso de aprendizaje, que se introducen paulatinamente para modificar el valor de los pesos en todas las conexiones con un determinado algoritmo, hasta conseguir un error dentro de los márgenes del diseño. La



red efectúa este proceso de manera cíclica, comparando la salida real de la red ( $y_i$ ), con la salida esperada ( $s_i$ ).

Matemáticamente, el objetivo de la fase de entrenamiento es minimizar el error para todas las neuronas de salida de la red, y todos los datos de entrenamiento. Tomando como referencia el error cuadrático medio (MSE), su cálculo puede plantearse como la ecuación:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{n_c} (s_i(n) - y_i(n))^2$$

- $N$  Es el número de datos de entrenamiento
- $n_c$  Es el número de neuronas de la capa de salida
- $y_i$  Es la predicción de la  $i$ -ésima neurona de la capa de salida, para un dato de entrenamiento  $n$ .
- $s_i$  Es el valor objetivo de la  $i$ -ésima neurona de la capa de salida, para un dato de entrenamiento  $n$ .

La modificación de los pesos se basa en el algoritmo seleccionado para realizar el entrenamiento, que varía según el tipo de red utilizada, y puede hacerse posterior a la introducción de cada ejemplo del conjunto, o una vez introducidos todos ellos.

Para minimizar el valor del error, se afronta el problema a través de la variación de la matriz de pesos y umbrales, es decir, construyendo un algoritmo que permita a la red ajustar sus unidades de proceso interno (pesos y umbrales), de acuerdo al error que se produce en las neuronas de la capa de salida. Por lo general, esos valores se hallan con algoritmos que adoptan la formulación iterativa dada por la ecuación:

$$W(n+1) = W(n) + \Delta W(n)$$

En donde:

- $W(n)$  Es el valor del peso particular para el patrón de entrada  $n$ .
- $W(n+1)$  Es el valor del peso particular para el patrón de entrada  $n+1$ .
- $\Delta W(n)$  Es el ajuste del valor del peso, para el patrón de entrada  $n$ .



Las bias o umbrales también requieren un ajuste progresivo, que se indica en la ecuación:

$$u(n+1) = u(n) + \Delta u(n)$$

En donde:

$u(n)$  Es el valor del umbral particular para el patrón de entrada  $n$ .

$u(n+1)$  Es el valor del umbral particular para el patrón de entrada  $n+1$ .

$\Delta u(n)$  Es el ajuste del umbral del peso, para el patrón de entrada  $n$ .

Una red neuronal debe aprender a calcular la salida correcta para cada entrada en el conjunto de ejemplos. Este proceso de aprendizaje se denomina proceso de entrenamiento o acondicionamiento. El conjunto de datos sobre el cual este proceso se basa es llamado conjunto de datos de entrenamiento.

La topología de la red y las diferentes funciones de cada neurona (entrada, activación y salida) no pueden cambiar durante el aprendizaje, mientras que los pesos sobre cada una de las conexiones si pueden hacerlo. El aprendizaje de una red neuronal significa adaptación de los pesos. Por tanto se puede afirmar que el proceso de aprendizaje termina cuando los valores de los pesos permanecen estables.

Al entrenar una ANN, a través del aprendizaje de un conjunto de entradas- salidas del sistema, se evita la complejidad necesaria para estimar los parámetros del sistema con modelos matemáticos. Una vez que la ANN es entrenada de manera apropiada, tendrá el conocimiento necesario para ejecutar la diagnosis de defectos.

Así podemos destacar dos métodos de aprendizaje: supervisado y no supervisado.

### **Aprendizaje supervisado**

En el *Aprendizaje supervisado* se conocen los datos del conjunto de aprendizaje y la información relativa a la solución del sistema. Por tanto, el aprendizaje se realiza mediante un entrenamiento controlado por un agente externo (targets) que determina la respuesta que debería generar la red a partir de una entrada determinada. El agente controla la salida de la red y en caso de que ésta no coincida con la deseada, se procederá a modificar los pesos de las conexiones, con el fin de conseguir que la salida obtenida se aproxime a la deseada.



En este tipo de aprendizaje se suelen considerar, a su vez, tres formas de llevarlo a cabo, que dan lugar a los siguientes aprendizajes supervisados:

- Aprendizaje por corrección de error: se basa en ajustar los pesos de las conexiones de la red en función de la diferencia entre los valores deseados y los obtenidos a la salida de la red, es decir, en función del error cometido en la salida.
- Aprendizaje por refuerzo: se basa en la idea de no indicar durante el entrenamiento exactamente la salida que se desea que proporcione la red ante una determinada entrada. Por tanto, la función del supervisor se reduce a indicar mediante una señal de refuerzo si la salida obtenida en la red se ajusta a la deseada (éxito = +1 o fracaso = -1), y en función de ello se ajustan los pesos basándose en un mecanismo de probabilidades. Es más lento que el anterior
- Aprendizaje estocástico: consiste básicamente en realizar cambios aleatorios en los valores de los pesos de las conexiones de la red y evaluar su efecto a partir del objetivo deseado y de distribuciones de probabilidad.

#### **Aprendizaje no supervisado**

Las redes con aprendizaje no supervisado no requieren influencia externa para ajustar los pesos de las conexiones entre sus neuronas: ni existe profesor externo que determine el aprendizaje, ni la red recibe información por parte del entorno que le indique si la salida generada es o no correcta. La red modificará los valores de los pesos a partir de información interna, y tratará de determinar las características significativas de los datos del conjunto de entrenamiento. A este tipo de modelos se les conoce también como sistemas autoorganizados, ya que la red se ajusta sólo a valores recibidos como entrada, y deben encontrar las características, regularidades, correlaciones o categorías que se puedan establecer entre los datos que se presenten en su entrada.

En cuanto a los algoritmos de aprendizaje no supervisado, en general se suelen considerar dos tipos, que dan lugar a los siguientes aprendizajes:

- Aprendizaje hebbiano: Esta regla de aprendizaje es la base de muchas otras, la cual pretende medir la familiaridad o extraer características de los datos de entrada. El fundamento es una suposición bastante simple: si dos neuronas  $N_i$  y  $N_j$  toman el mismo estado simultáneamente (ambas activas o ambas inactivas), el peso de la conexión entre ambas se incrementa.

– Aprendizaje competitivo y comparativo: Se orienta a la clusterización o clasificación de los datos de entrada. Como característica principal del aprendizaje competitivo se puede decir que, si un patrón nuevo se determina que pertenece a una clase reconocida previamente, entonces la inclusión de este nuevo patrón a esta clase matizará la representación de la misma. Si el patrón de entrada se determinó que no pertenece a ninguna de las clases reconocidas anteriormente, entonces la estructura y los pesos de la red neuronal serán ajustados para reconocer la nueva clase.

Además, este tipo de aprendizaje también posee una variante denominada *Aprendizaje por refuerzo*, en la que no se dispone de información concreta sobre el error cometido por la red para cada ejemplo de aprendizaje, sino que simplemente se determina si la salida producida para dicho patrón es adecuada o no.

Existen numerosas ANN que trabajan con este tipo de aprendizaje, entre ellas, los Mapas Autoorganizados (SOM), las redes de Hopfield, Kohonen y las ART.

#### 4. CLASIFICACIÓN Y TOPOLOGÍA DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES

Podemos clasificar las RNA de acuerdo con la dirección de la conexión de sus neuronas, pudiendo encontrar redes feedforward o redes feedback.

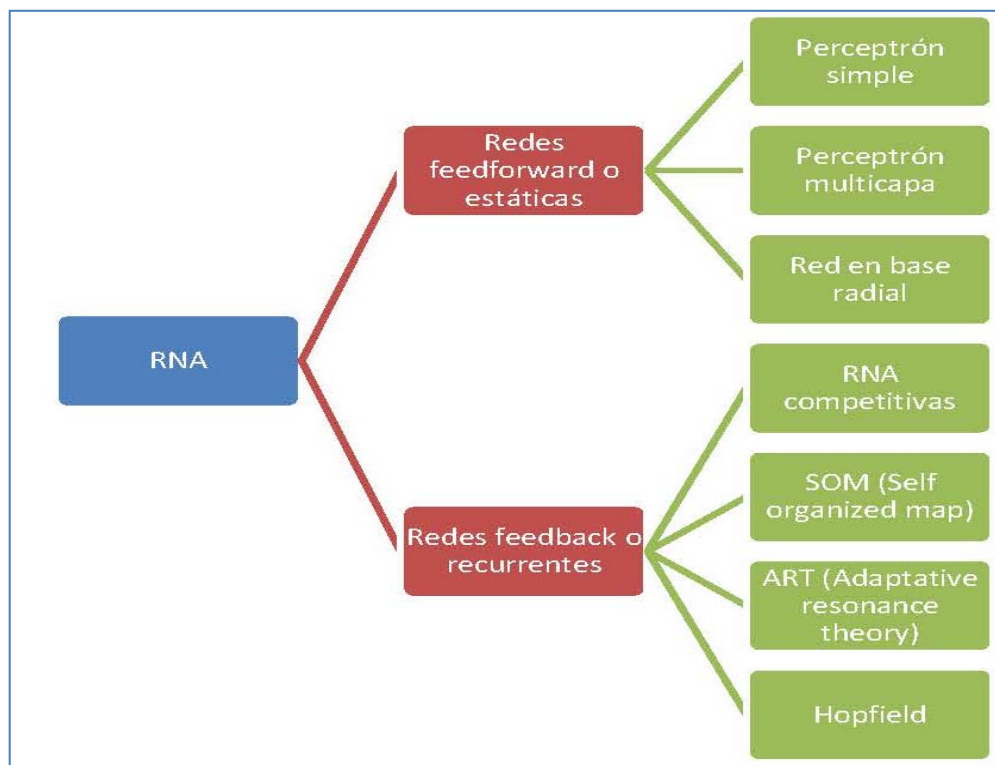


Figura 4.20.- Clasificación de las redes neuronales. [P4]



## REDES FEEDFORWARD

Las redes feedforward se caracterizan porque las interconexiones de sus neuronas son siempre unidireccionales, al contrario que en las redes feedback, en las que hay enlaces de capas posteriores hacia capas anteriores. Se denominan también estáticas porque con una entrada determinada producen una única salida, no se comportan como memorias, esto es, la respuesta no es función de estados previos. Por esta razón se las compara en ocasiones con circuitos combinacionales.

### 1. Redes Perceptrón Multicapa

El perceptrón multicapa es una red neuronal artificial con múltiples capas. Esto le permite resolver problemas que no son linealmente separables, lo cual es la principal limitación del perceptrón. Su topología está compuesta por una capa de entrada, una o varias capas ocultas y una capa de salida, como muestra la figura 4.21. El perceptrón multicapa puede ser totalmente o localmente conectado.

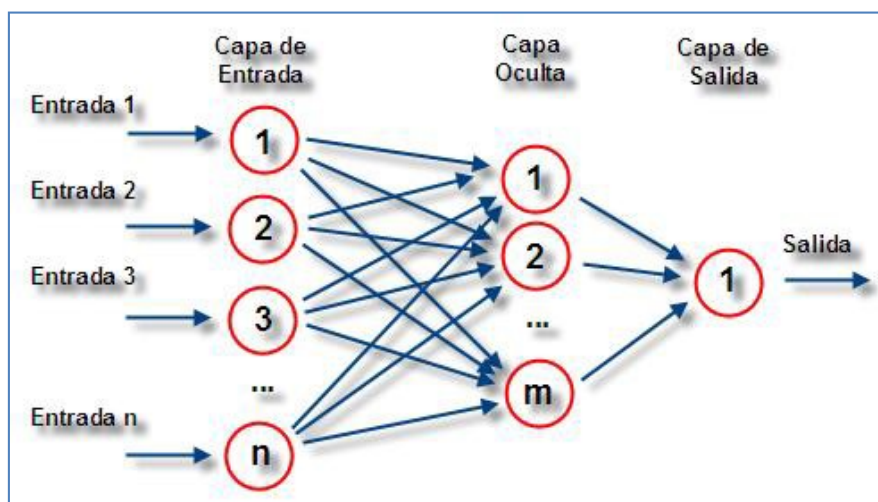


Figura 4.21.- Topología de una red perceptrón multicapa. [P4]

Las capas se diferencian por:

- Capa de entrada: Se introducen los patrones de entrada en la red, no se produce procesamiento. Existe una neurona por cada señal introducida.
- Capas ocultas: Formada por aquellas neuronas cuyas entradas provienen de capas anteriores y cuyas salidas pasan a neuronas de capas posteriores.
- Capa de salida: Neuronas cuyos valores de salida se corresponden con las salidas de toda la red.

## 2. Redes de Base Radial

Las redes de base radial son una clase especial de redes feedforward, con tres capas generalmente (entrada, oculta, salida).

Las neuronas de la capa oculta usan como función de activación una función de base radial (por ejemplo, la función de Gauss), por tanto, tenemos tantas funciones de base radial como neuronas tenga la capa oculta, con centro y longitud definidas por su vector de pesos asociado. La última capa realiza una interpolación, de modo que una red de base radial lo que hace es buscar una función que se ajuste al espacio de patrones de entrada.

Su aprendizaje, como decimos, es híbrido, y su convergencia es muy rápida (más aún que la de redes como las *backpropagation*), aunque necesitan muchos elementos de procesamiento en la capa oculta para obtener una buena interpolación, lo que hace que sus requisitos computacionales sean elevados.

La figura representa la topología de una red de base radial integrada en Matlab, con una capa oculta de  $S_1$  neuronas en base radial y una capa de salida lineal de  $S_2$  neuronas.

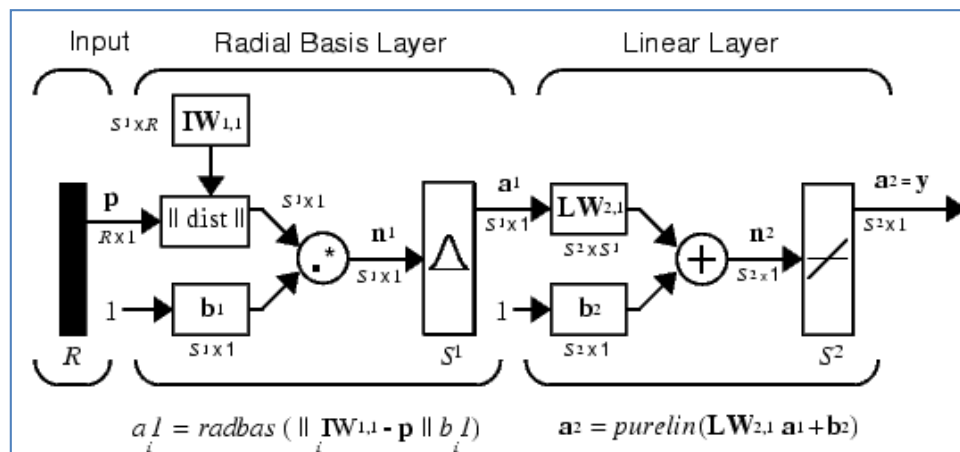


Figura 4.22.- Topología de una red de base radial. [P4]

## REDES FEEDBACK

Las redes feedback se llaman también recurrentes o dinámicas porque su salida resulta de una evolución a través de una serie de estados tras la presentación de la entrada, y pueden tener bucles. Se las compara, pues, con circuitos secuenciales.

### 1. Redes competitivas

La principal característica de las redes competitivas y su comportamiento en aprendizaje es que las neuronas de su capa de salida compiten entre sí de tal forma que la que resulta ganadora se activa e identifica la clase a la que pertenece el patrón de entrada (se definen tantas neuronas de salida como clases o clústeres quieran obtenerse), habiendo únicamente una neurona que se activa en cada ciclo. Es una gran aproximación al comportamiento de las redes de neuronas biológicas.

En la figura se muestra un esquema básico del funcionamiento de la capa oculta, y cómo sus neuronas están conectadas entre sí, compitiendo por activarse.

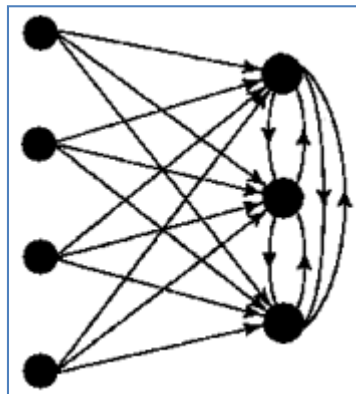


Figura 4.23.- Topología de una red competitiva. [P4]

### 2. Mapas Autoorganizados o Redes SOM (Self Organized Map)

Un modelo SOM está compuesto por dos capas de neuronas:

- La capa de entrada (formada por N neuronas, una por cada variable de entrada) se encarga de recibir y transmitir a la capa de salida la información procedente del exterior.
- La capa de salida (formada por M neuronas) es la encargada de procesar la información y formar el mapa de rasgos. Normalmente, las neuronas de la capa de salida se organizan

en forma de mapa, como en la figura 4.23, aunque a veces también se utilizan capas de una sola dimensión (cadena lineal de neuronas) o de tres dimensiones (paralelepípedo).

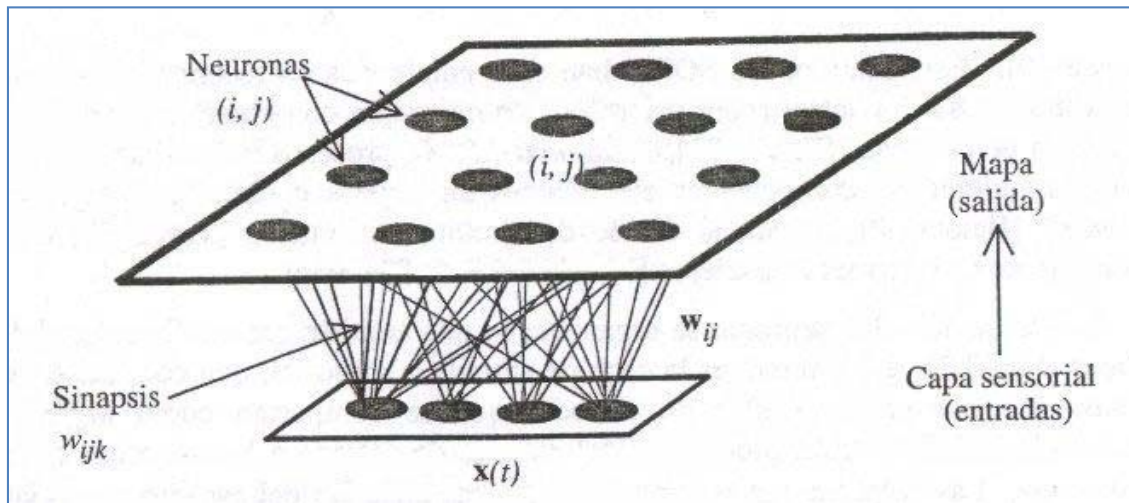


Figura 4.24.- Topología de una red SOM. [P4]

### 3. Redes de Hopfield

Hopfield comienza en 1985 a trabajar en el modelo que después llevaría su nombre. Estas redes son bastante parecidas al modelo del Perceptrón, pero presentan una característica adicional: las neuronas en la capa oculta, presentan conexiones de salida hacia otras neuronas de la capa oculta. Además, cada neurona de la capa de entradas está conectada con una neurona de la capa oculta, y cada neurona de la capa oculta emite una sola conexión hacia la capa de salidas. Y estas conexiones (capa de entradas - capa oculta, y capa oculta - capa de salidas) no implican cálculo de pesos sinápticos ni de valores umbral.

Las características generales de las redes Hopfield son:

- Una única capa oculta (construida y posteriormente entrenada).
- Interconexión completa, realimentación.
- Respuesta dinámica: la red progresa con la entrada hasta alcanzar un estado estable (hasta que la salida deja de cambiar).
- Aplicaciones: reconocimiento de patrones, almacenados en sus pesos sinápticos.

En la figura puede verse la topología de una red de Hopfield.

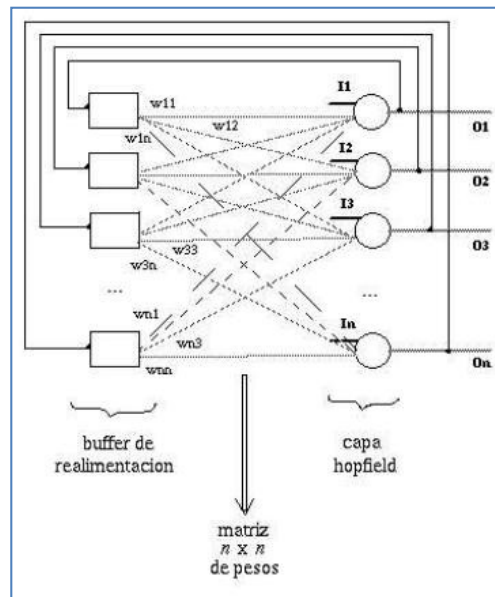


Figura 4.25.- Topología de una red de Hopfield. [P4]

Normalmente se utilizan redes capaces de entrenarse con métodos Supervisados, ya que se cuenta con la ventaja de conocer *a priori* el tipo de clases asociado a las muestras disponibles. En este caso se han usado tres ANN más utilizadas, y que históricamente han proporcionado mejores resultados en el área de diagnóstico de defectos a través de tareas de clasificación: Redes Perceptron Multicapa (MLP), Funciones de Base Radial (RBF) y Redes Neuronales Probabilísticas (PNN). Las reglas de entrenamiento y estructura de cada clasificador, varían de acuerdo al tipo de red empleada.





## **TEMA 5:**

### **ELABORACIÓN DE LOS MODELOS TEORICOS DE VIBRACIONES EN RODAMIENTOS**







El rodamiento o cojinete de rodadura es un elemento mecánico que se sitúa entre dos componentes de una máquina, con un eje de rotación común, de forma que un componente puede girar respecto al otro.

Hasta el año 1940, el diseño y aplicación de rodamientos podría considerarse más un arte que una ciencia, ya que se conocía muy poco acerca del fenómeno físico que ocurre durante su operación. Desde entonces, ha tenido lugar un avance significativo de ritmo exponencial hasta nuestros días. Actualmente, la mayoría de la información técnica relativa al comportamiento de los rodamientos, se presenta en los catálogos de los fabricantes, y se basa en las publicaciones del Instituto Nacional de Estándares Americano (ANSI), Organización Internacional de Estándares (ISO), u otras similares.

La función principal es dar apoyo o soporte a los elementos portadores:

- Soporte de ejes → Anillo interior fijo y anillo exterior móvil.
- Soporte de árboles → Anillo exterior fijo y anillo interior móvil.

Los rodamientos están diseñados para que los rozamientos originados durante el giro no sean de deslizamiento (cojinetes), sino de rodadura, presentando muchas características similares a los cojinetes de fricción:

- Bajo rozamiento.
- Tolerancias y acabados muy rígidos.
- Necesidad de un montaje preciso.
- Sensible a impactos, sobrecargas, humedad, suciedad...
- Punto crítico dentro de la máquina, seleccionado para efectuar el mantenimiento.

A su vez, presentan muchas ventajas frente a los cojinetes de fricción: admiten carga axial, algunos tipos son autoalineables, y su coeficiente de rozamiento es inferior y prácticamente independiente de la velocidad y la carga.

En cambio, su precio es más elevado, y su montaje más complejo.

## 1. EL RODAMIENTO

El rodamiento consiste, básicamente, en dos aros o anillos (anillo interior y anillo exterior) o, en el caso de los rodamientos axiales, arandelas (arandela superior y arandela inferior), entre los cuales se alojan los elementos rodantes (bolas o rodillos) que discurren por las pistas de rodadura. Para prevenir que los elementos rodantes interactúen entre sí, estos están alojados en jaulas o separadores, tal y como se puede ver en las siguientes figuras:

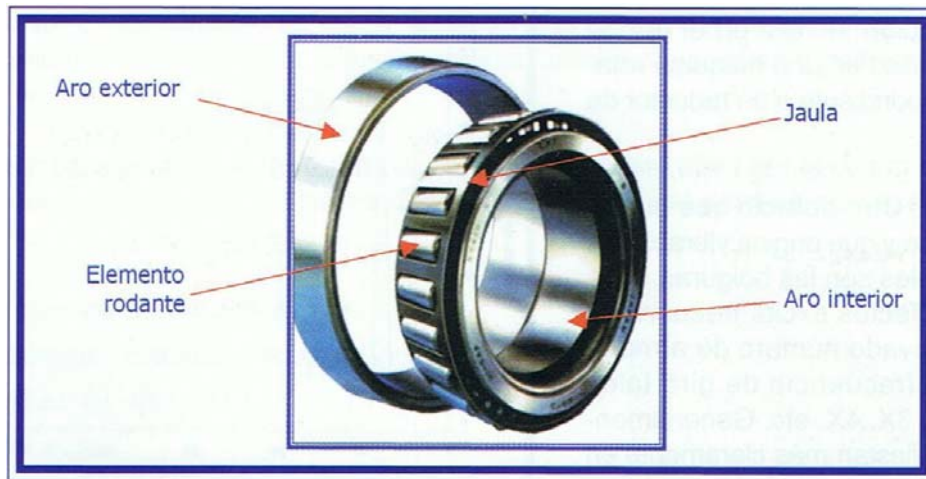


Figura 5.1.- Elementos que componen un rodamiento de rodillos. [P5]

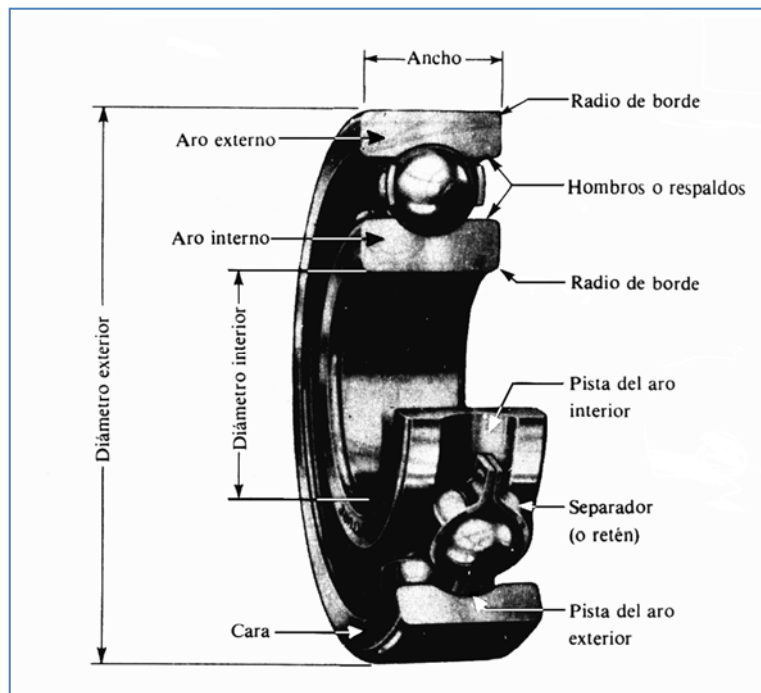


Figura 5.2.- Rodamiento de bolas seccionado. [P2]



## **1.1. TIPOS DE RODAMIENTOS [P2]**

Hay varias formas de clasificar los rodamientos. En esta ocasión, vamos a desarrollar tres:

### **1. SEGÚN LA DIRECCIÓN DE CARGA**

#### **A. RODAMIENTOS RADIALES**

Diseñados para resistir cargas en dirección perpendicular al eje. El ejemplo más claro es el de las ruedas de un carro; se apoyan en el suelo y reciben la carga en el eje, y de esta forma los rodamientos de las ruedas trabajan bajo carga radial.

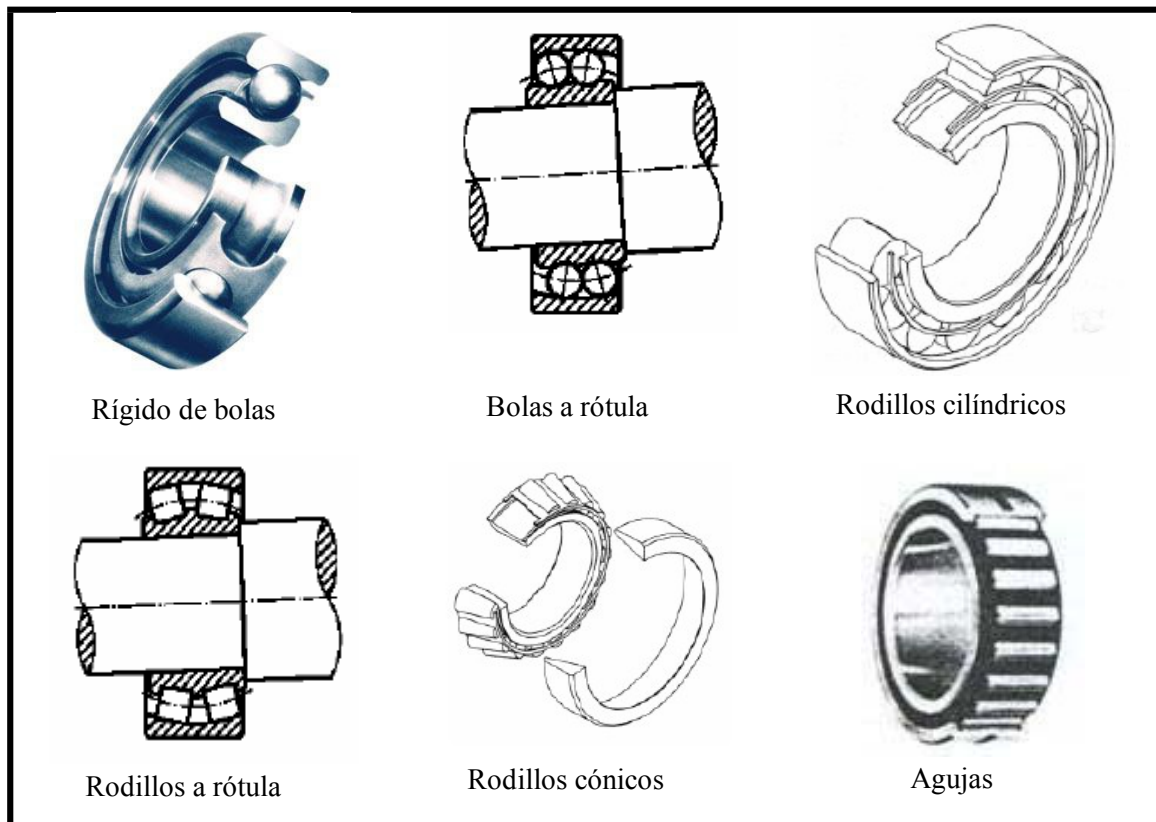


Figura 5.3.- Tipos de rodamientos radiales. [P4]

#### **B. RODAMIENTOS AXIALES**

Diseñados para resistir cargas en la misma dirección del eje. El ejemplo más claro es un carrusel: el peso total de esta máquina actúa verticalmente hacia el suelo y debe rotar en torno a un eje vertical al suelo; debe utilizarse un rodamiento axial de gran diámetro, cuyo aro superior sostenga al carrusel y cuyo aro inferior se apoye en el suelo.

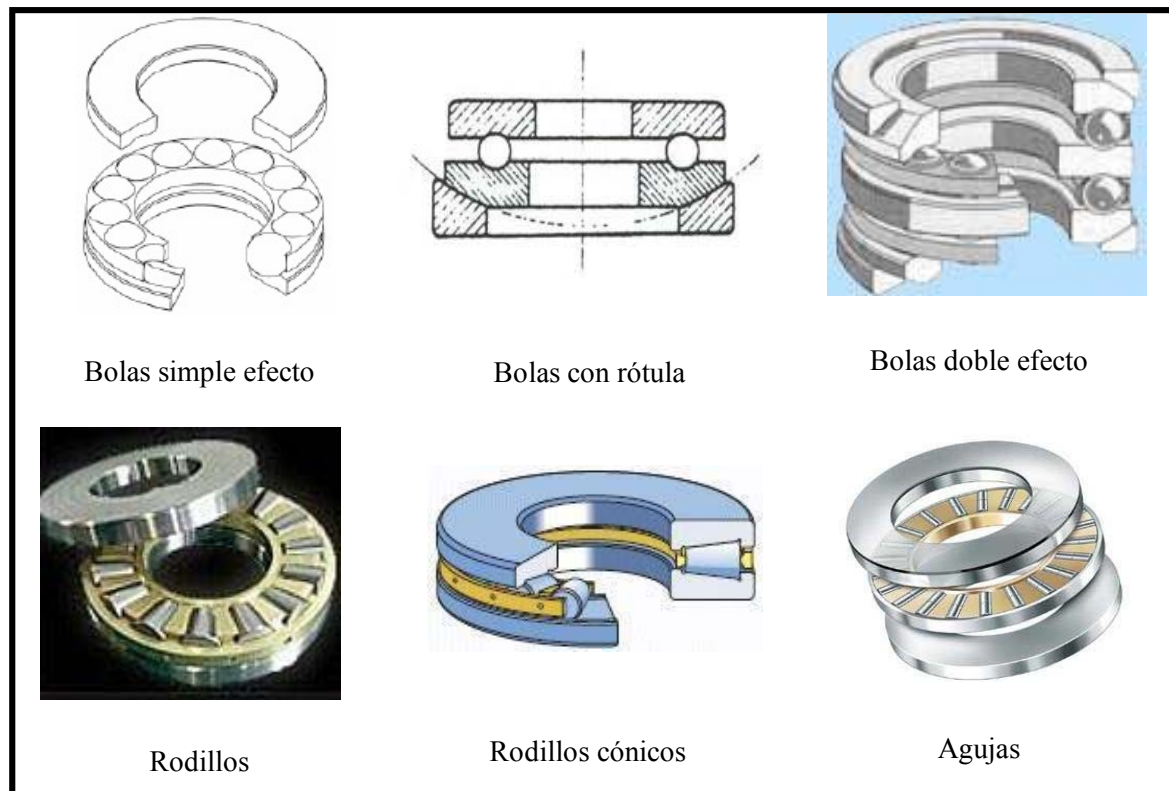


Figura 5.4.- Tipos de rodamientos axiales. [P4]

### C. RODAMIENTO DE CONTACTO ANGULAR

Son una mezcla de los casos anteriores, se basan en un rodamiento similar al radial con un diseño especial de los aros para soportar cargas axiales mayores que un rodamiento radial simple. Sus aplicaciones son muy amplias, debido a que un eje puede desarrollar cargas en una dirección inesperada, y al ahorro que se genera al colocar uno solo.

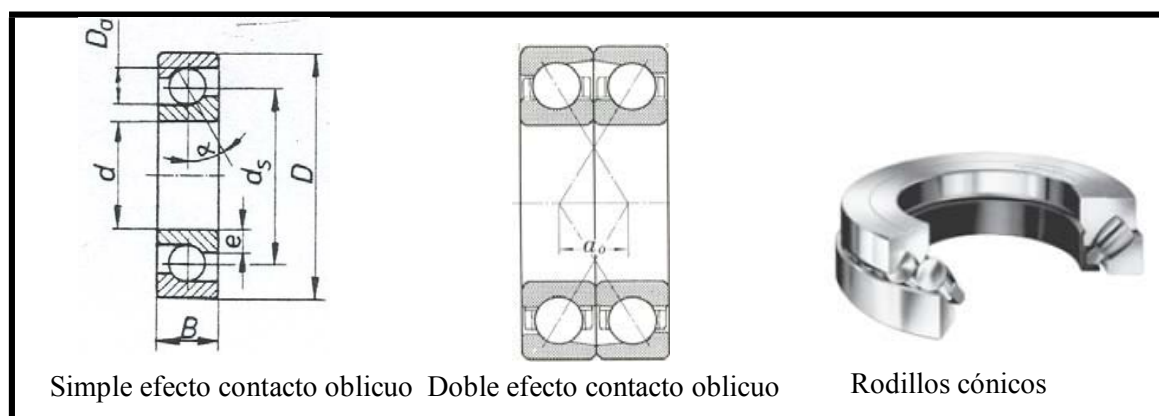


Figura 5.5.- Tipos de rodamientos mixtos. [P4]



## **2. SEGÚN LA RIGIDEZ DEL RODAMIENTO**

### **A. RODAMIENTOS RÍGIDOS**

Son aquellos que no aceptan desalineamientos del eje. Ante un desalineamiento se generan cargas que pueden dañar definitivamente el rodamiento.



**Figura 5.6.- Rodamientos rígidos. [P2]**

### **B. RODAMIENTOS ROTULADOS**

Son aquellos que, por un diseño especial de los aros, permiten que el eje gire algunos grados sin desarmar el rodamiento.

Esta característica se logra con una pista de rodadura esférica que permite a las bolas o barriletes desplazarse para acomodarse al desalineamiento del eje. Son muy utilizados en maquinaria pesada debido a la necesidad de prevenir daños frente a las deformaciones de los ejes, cargas provocadas por dilataciones térmicas y cargas dinámicas.



### **3. SEGÚN EL ELEMENTO RODANTE**

Existen diversos elementos rodantes que varían según las aplicaciones.

Por ejemplo, los rodamientos rígidos de bolas pueden soportar cargas radiales moderadas así como cargas axiales pequeñas. Tienen baja fricción y pueden ser producidos con gran precisión. Por lo tanto, son preferidos para motores eléctricos de medio y pequeño tamaño.

Los rodamientos de rodillos esféricos pueden soportar cargas radiales muy pesadas y son oscilantes, lo que les permite asumir flexiones del eje o pequeñas desalineaciones entre dos rodamientos que soportan un mismo eje. Son populares para aplicaciones con cargas fuertes y deformaciones producidas por las cargas, como ingeniería pesada o máquinas grandes, donde es habitual desalineaciones en los apoyos de los rodamientos. [P2]

#### **A. RODAMIENTOS DE BOLAS**

Son usados en una gran variedad de aplicaciones. Son fáciles de diseñar, no separables, capaces de operar en altas e incluso muy altas velocidades y requieren poca atención o mantenimiento en servicio. Estas características, unidas a su ventaja de precio, hacen a estos rodamientos los más populares de todos los rodamientos. Los más utilizados son:

##### **Rodamientos rígidos de una hilera de bolas**

Son los más utilizados, y particularmente versátiles. Su diseño es sencillo, no desarmables, son apropiados para velocidades altas e incluso muy altas y resistentes durante su funcionamiento, exigiendo muy poco mantenimiento. Las ranuras profundas de los caminos de rodadura y el alto grado de oscilación entre éstas y las bolas, permiten que los rodamientos rígidos de bolas soporten cargas axiales en ambos sentidos, además de cargas radiales, incluso a altas velocidades.



**Figura 5.7.- Explosionado de un rodamiento rígido de una hilera de bolas.**



Este tipo de rodamientos puede presentar escotes de llenado, tanto en el aro interior como en el exterior, permitiendo la incorporación de más bolas y de mayor tamaño. Tienen más capacidad de carga radial pero su capacidad de carga axial es limitada, y son incapaces de funcionar a velocidades tan altas como los rodamientos sin escotes.

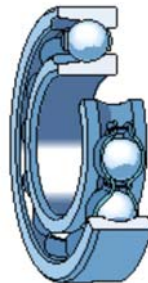


Figura 5.8.- Rodamiento rígido de una hilera de bolas con escote de llenado.

### **Rodamientos rígidos de dos hileras de bolas**

El diseño es idéntico a los rodamientos rígidos de una hilera de bolas, pero son ligeramente más anchos. Son adecuados para disposiciones donde la capacidad de carga de los de una hilera es insuficiente.

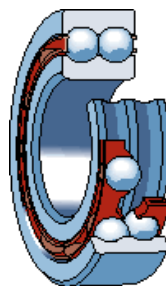


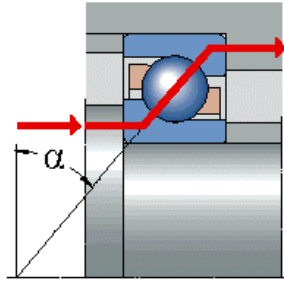
Figura 5.9.- Rodamiento rígido de dos hilera de bolas.

### **Rodamientos de bolas con contacto angular**

Este tipo de rodamientos tienen los caminos de rodadura de sus aros interior y exterior desplazados entre sí en la dirección del eje del rodamiento. Por tanto, están diseñados para soportar cargas radiales y axiales simultáneas.

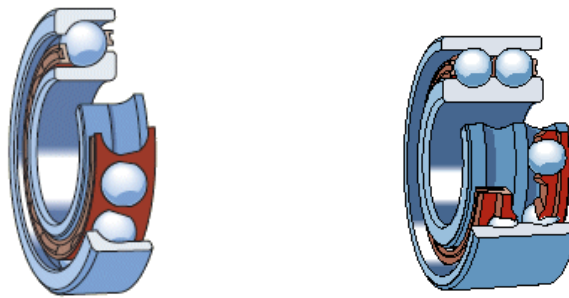
La capacidad de carga axial se incrementa al incrementar el ángulo de contacto. El ángulo de contacto es el ángulo que forma la línea que une los puntos de contacto entre la bola y los caminos de rodadura en el plano radial (sobre esta línea se transmite la carga de un camino de rodadura al otro), con una perpendicular al eje del rodamiento.





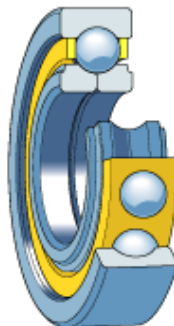
**Figura 5.10.- Ángulo de contacto en rodamientos de bolas con contacto angular.**

Los hay con una hilera de bolas con contacto angular, y con dos hileras, con mayor capacidad de carga. Suelen ser de diseño no desarmable.



**Figura 5.11.- Rodamientos de una hilera y dos hileras de bolas con contacto angular.**

Un caso particular de este tipo de rodamientos, son los rodamientos con cuatro puntos de contacto, que poseen caminos de rodadura diseñados para soportar cargas axiales en ambos sentidos. El aro interior está partido permitiendo la incorporación de un gran número de bolas al rodamiento, dotándole de una gran capacidad de carga. Tienen un ángulo de contacto de  $35^\circ$  o  $45^\circ$ . Son de diseño desmontable (el aro exterior, las bolas y la jaula pueden montarse por separado de las dos mitades del aro interior). Ocupan bastante menos espacio axial que los rodamientos de dos hileras.



**Figura 5.12.- Rodamientos de bolas con cuatro puntos de contacto.**





### **Rodamientos de bolas a rótula**

Tienen dos hileras de bolas que apoyan sobre un camino de rodadura esférico en el aro exterior, permitiendo desalineaciones angulares del eje respecto al soporte: libera el giro del aro interior respecto a los dos ejes geométricos perpendiculares al eje del aro exterior. Tienen menor fricción que otros tipos de rodamientos, por lo que se calientan menos en las mismas condiciones de carga y velocidad, siendo aptos para mayores velocidades.

Son utilizados en aplicaciones donde pueden producirse desalineaciones considerables por efecto de las dilataciones, de flexiones en el eje o por el modo de construcción.



Figura 5.13.- Rodamiento de bolas a rótula.

### **Rodamientos axiales de bolas de simple efecto**

Consta de una hilera de bolas entre dos aros, uno de los cuales, el aro fijo al eje, es de asiento plano, mientras que el otro, el aro apoyado en el soporte, puede tener asiento plano o esférico (se apoya en una contraplaca). Los rodamientos con asiento plano deberían ser los preferidos, pero los de asiento esférico son muy útiles para compensar pequeñas inexactitudes de fabricación de los soportes. Está destinado a resistir solamente carga axial en una dirección.



## B. RODAMIENTOS DE RODILLOS

Los rodamientos cilíndricos son más rígidos que los de bolas y se utilizan para cargas pesadas y ejes de gran diámetro. Normalmente tiene una hilera de rodillos guiados por pestañas de uno de los aros, mientras que el otro aro puede tener pestañas o no.

Según sea la disposición de las pestañas, hay varios tipos de rodamientos de rodillos cilíndricos:

- ☐ Tipo NU: con dos pestañas en el aro exterior y sin pestañas en el aro interior. Sólo admiten cargas radiales, son desmontables y permiten desplazamientos axiales relativos del alojamiento y eje en ambos sentidos.
- ☐ Tipo N: con dos pestañas en el aro interior y sin pestañas en el aro exterior. Sus características similares al anterior tipo.
- ☐ Tipo NJ: con dos pestañas en el aro exterior y una pestaña en el aro interior. Puede utilizarse para la fijación axial del eje en un sentido.
- ☐ Tipo NUP: con dos pestañas integrales en el aro exterior y con una pestaña integral y dos pestañas en el aro interior. Una de las pestañas del aro interior no es integral, es decir, es similar a una arandela para permitir el montaje y el desmontaje. Se utilizan para fijar axialmente un eje en ambos sentidos.

### **Rodamientos de rodillos cilíndricos de empuje**

Son apropiados para aplicaciones que deben soportar pesadas cargas axiales en una dirección, y donde la capacidad de carga de los rodamientos de bolas de empuje es inadecuada. Además, son insensibles a los choques, son fuertes y requieren poco espacio axial. Tienen diversos usos industriales, y su extracción es segura.



**Figura 5.14.- Rodamiento de rodillos cilíndricos de empuje.**



### **Rodamientos axiales de rodillos a rótula**

Tienen una hilera de rodillos situados oblicuamente, los cuales, guiados por una pestaña del aro fijo al eje, giran sobre la superficie esférica del aro apoyado en el soporte. En consecuencia, el rodamiento posee una gran capacidad de carga y es de alineación automática. Los rodillos giran separados de la pestaña por una fina capa de aceite, y por tanto, puede girar a una gran velocidad, aun soportando elevada carga. Contrariamente a los otros rodamientos axiales, éste puede resistir también cargas radiales.

### **Rodamientos de rodillos cónicos**

Debido a la posición oblicua de los rodillos y caminos de rodadura, es especialmente adecuado para resistir cargas radiales y axiales simultáneas. Es desmontable: el aro interior con sus rodillos y el aro exterior se montan cada uno separadamente.



**Figura 5.15.- Rodamientos de rodillos cónicos.**



### C. RODAMIENTOS DE AGUJAS

Son rodamientos con rodillos cilíndricos muy delgados y largos en relación con su menor diámetro. A pesar de su pequeña sección, estos rodamientos tienen una gran capacidad de carga y son eminentemente apropiados para las aplicaciones donde el espacio radial es limitado.

Para soportar cargas radiales y axiales combinadas, los rodamientos de agujas se pueden combinar con un rodamiento axial de agujas con una espiga de centraje.

Los más utilizados son: [P2]

#### Coronas de agujas

Son componentes completos y listos para montar en los rodamientos. Constituyen una elección excelente para aplicaciones que requieran una disposición de rodamientos muy rígida, así como una gran capacidad de carga.

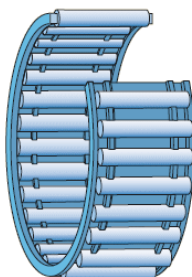


Figura 5.16.- Corona de agujas.

#### Casquillos de agujas

Son rodamientos de agujas con un aro exterior delgado embutido con fondo o sin fondo. Se caracterizan por su pequeñísima sección transversal y su elevada capacidad de carga. El casquillo es de chapa de acero templado y la corona de agujas (generalmente una sola hilera de agujas) forma una unidad no desarmable. El espacio disponible para el lubricante es suficientemente amplio para permitir largos intervalos de lubricación.

Se usan en aplicaciones en las que el agujero del soporte no se puede usar como camino de rodadura de una corona de agujas. Se montan con un ajuste de interferencia en el agujero del alojamiento. El diseño del alojamiento es simple y se puede conseguir de forma



económica, puesto que no se requieren resaltes ni anillos de retención para fijar el rodamiento axialmente.

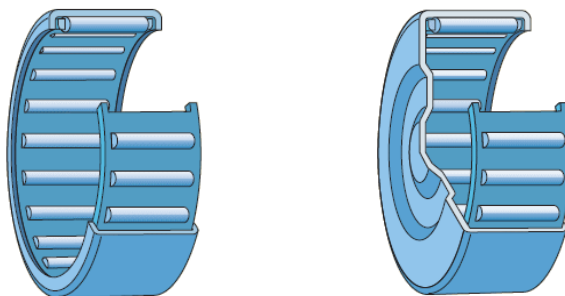


Figura 5.17.- Rodamientos con casquillo de agujas sin fondo y con fondo.

Los casquillos de agujas con fondo son adecuados para disposiciones de rodamientos en los extremos de ejes. El diseño perfilado de la base con fondo soporta pequeñas fuerzas axiales de guiado. Suelen montarse directamente en el eje.

### **Rodamientos de agujas con aros mecanizados**

Los rodamientos de agujas con aros mecanizados de acero para rodamientos al cromo tienen una baja sección transversal y una capacidad de carga muy elevada para su tamaño. Dependiendo de la aplicación, se pueden utilizar con o sin aro interior.

Los rodamientos de agujas sin aro interior se usan en disposiciones de rodamientos compactas si se puede temprar y rectificar el eje. Al no ser necesario un aro interior, el diámetro del eje puede ser mayor, y por lo tanto, más fuerte y rígido. El desplazamiento axial del eje respecto del alojamiento sólo está limitado por la anchura del camino de rodadura del eje. Mecanizando los caminos de rodadura del eje conforme a las precisiones de dimensiones y forma adecuadas, se pueden conseguir disposiciones de rodamientos con una gran precisión de giro.

Los rodamientos de agujas con aro interior se usan para las disposiciones en las que no es posible o resulta muy costoso temprar y rectificar el eje. Sólo permiten el desplazamiento axial del eje respecto del alojamiento dentro de ciertos límites. Si el desplazamiento axial permisible es insuficiente, se puede usar un aro interior prolongado.

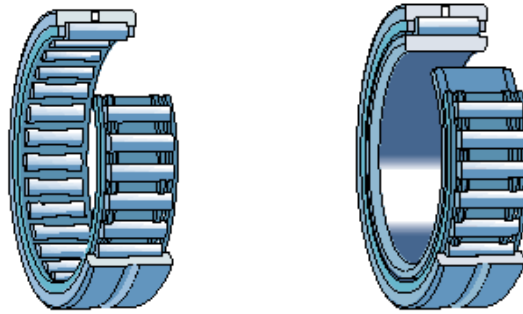


Figura 5.18.- Rodamientos de agujas con aro mecanizado, sin aro interior y con aro interior.

### **Rodamientos de agujas autoalineables**

Sobre el aro exterior llevan instalados dos aros de asiento de polímero con una superficie interior esférica cóncava que se introduce en un manguito de chapa de acero embutido, permitiendo que el rodamiento se alinee por sí mismo. Por tanto, son insensibles a la desalineación estática del eje respecto al soporte.

Se pueden dar con aro interior (el eje se puede temprar y rectificar) o sin aro interior (sólo permiten desplazamientos axiales del eje respecto al alojamiento dentro de ciertos límites).

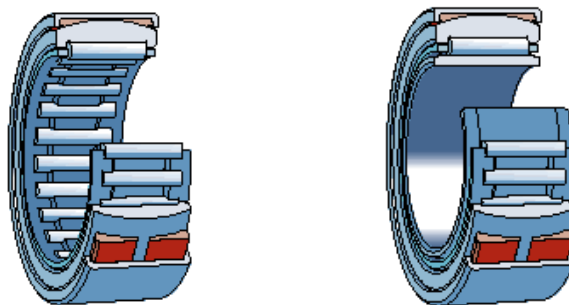


Figura 5.19.- Rodamiento de agujas autolineables, sin aro y con aro interior.

### **Rodamientos de aguja de empuje**

Pueden soportar pesadas cargas axiales, son insensibles a las cargas de choque y proveen aplicaciones de rodamientos duros requiriendo un mínimo de espacio axial.

## **1.2. RODAMIENTOS PARA CONDICIONES ESPECIALES**

### **Rodamientos con sensores.**

Incorporan una serie de sensores para poder contar con la información exacta sobre el estado de funcionamiento de los componentes: número de revoluciones, velocidad, dirección de giro, posición relativa/recuento, aceleración o deceleración...

Suelen constar de un rodamiento rígido de bolas, una unidad sensora activa protegida de las influencias externas y un aro impulsor formando todo ello una unidad integral.



Figura 5.20.- Rodamiento con sensor. [P2]

### **Rodamientos híbridos**

Los aros están hechos de acero y los elementos rodantes de nitruro de silicio ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ , que además es un excelente aislante eléctrico), pueden alcanzar una velocidad más alta y asegurar una mayor vida útil que los rodamientos hechos completamente de acero.

### **Rodamientos con aislante.**

Son rodamientos con una capa de óxido de aluminio de  $100\text{ }\mu\text{m}$  de grosor en las superficies exteriores del aro exterior o interior, que puede soportar tensiones de hasta  $1000\text{ V CC}$ . Para recubrir al rodamiento con este aislante, se utiliza un spray de plasma, permitiendo un recubrimiento extremadamente coherente con un grosor uniforme, que posteriormente recibe un tratamiento para hacerlo insensible al vaho y a la humedad.

Se usan en equipos donde corren el riesgo de ser afectados por el paso de una corriente eléctrica, que podría dañar las superficies de sus elementos rodantes y caminos de rodadura, y degradar la grasa rápidamente.



### **Rodamientos para altas/bajas temperaturas.**

Para disposiciones de rodamientos que deban funcionar a temperaturas extremas en el margen de  $-150$  a  $+350$  °C, o que deban soportar diferencias de temperaturas muy grandes hacen que los rodamientos normales no sean apropiados, y deben usarse: pasta para lubricación a altas temperaturas, superficies fosfatadas al manganeso (protegerlo de la corrosión), placas a ambos lados para evitar la entrada de contaminantes sólidos y la fuga del lubricante, jaula de segmentos de grafito (mejora la lubricación), jaula en forma de corona, compuesta sólo de grafito, capaz de soportar cargas más pesadas.

Las aplicaciones más típicas de estos rodamientos son por ejemplo en carrillos de secadero, hornos o transportadores para los equipos de lacado.

### **Rodamientos con Solid Oil**

Poseen una jaula y elementos rodantes convencionales, pero incorporan una matriz polimérica con aceite y millones de micro-poros, que permite la liberación gradual del aceite, garantizando una lubricación uniforme durante la vida de servicio del rodamiento. Aunque la matriz llena por completo el espacio interno del rodamiento, no perjudica su rendimiento o funcionalidad. Son usados para aplicaciones extremadamente exigentes, donde su re-lubricación resulta difícil y los altos niveles de contaminación afectan su funcionamiento.



**Figura 5.21.- Rodamiento con Solid Oil. [P2]**



### Rodamientos de material polimérico

Los rodamientos de bolas de polímero constan de

- Aros de polímero
- Bolas hechas de acero inoxidable, vidrio, polímero u otros materiales
- Una jaula de polímero.

Los polímeros utilizados tienen bajo coeficiente de fricción y son muy resistentes al desgaste y fatiga. Son autolubricados (no precisan lubricante) y su funcionamiento es silencioso (buenas propiedades amortiguadoras). Además, otra de sus propiedades es su buena resistencia a la corrosión y a las sustancias químicas.



Figura 5.22.- Rodamientos de material polimérico. [P2]

Aunque la carga y la velocidad máxima que puede soportar son muy inferiores a las de los rodamientos convencionales totalmente de acero, tienen su relevancia en aplicaciones donde el peso es un factor importante para el diseño.

### 1.3. RODAMIENTOS EMPLEADOS

Vamos a ver los principales tipos de rodamientos usados en ensayos, y sus principales características.

#### RODAMIENTOS FAG modelo 7206B

La figura ilustra un rodamiento de bolas típico y el diagrama del rodamiento de bolas de contacto angular fabricado por FAG, modelo 7206 B.

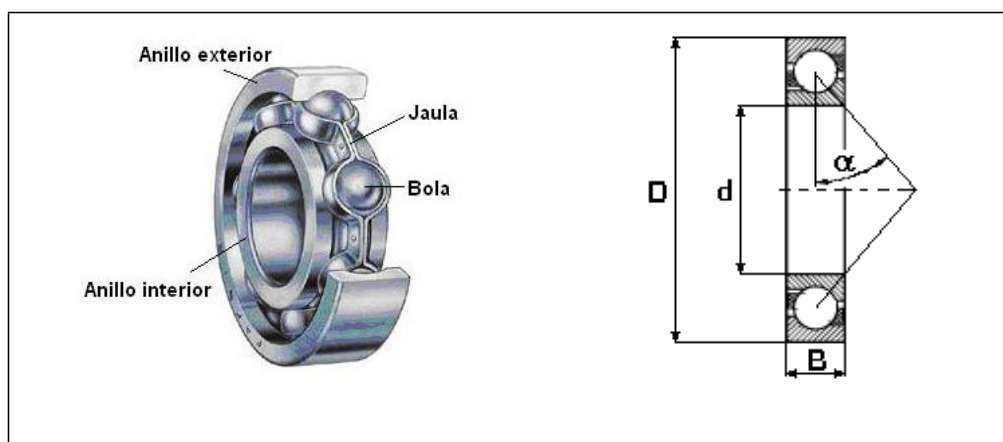


Figura 5.23.- Rodamiento FAG modelo 7206B.

Los parámetros geométricos de diseño más importantes son:

Diámetro Externo (D)	62 mm
Diámetro Interno (d)	30 mm
Ancho (B)	16 mm
Número de Bolas (n)	13
Diámetro de las Bolas	9,6 mm
Angulo de Contacto ( $\alpha$ )	40°
Peso	202 g
Capacidad Estática de Carga	14,1 kN
Capacidad Dinámica de Carga	20,4 kN

Tabla 5.1.- Parámetros geométricos de diseño FAG 7206B.

Son los rodamientos más empleados en los ensayos de las tesis estudiadas.



## RODAMIENTOS SKF 6206

Otro de los rodamientos empleado es el rodamientos rígidos de 9 bolas SKF 6206.



Figura 5.24.- Rodamiento SKF 6206 de 9 bolas.

Estos rodamientos están compuestos por los anillos interno y externo, 9 bolas y una jaula de poliamida. Es usado en la tesis de José María Marín López

## LA CAJA DE ENGRANAJES

En las tesis de Carlos José Roda Vázquez e Higinio Rubio, se hizo uso de una caja de engranajes o sistema reductor, compuesto por un grupo de engranajes cónicos, un grupo de engranajes cilíndrico-helicoidales, rodamientos, ejes, soportes, carcasa, etc.

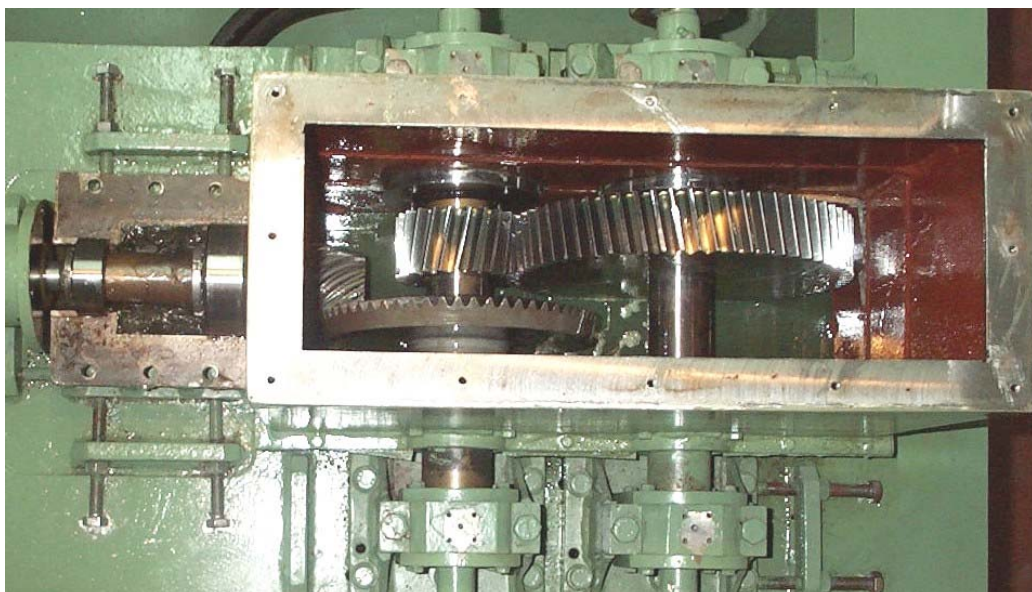


Figura 5.25.- Caja de engranajes del banco de ensayos.

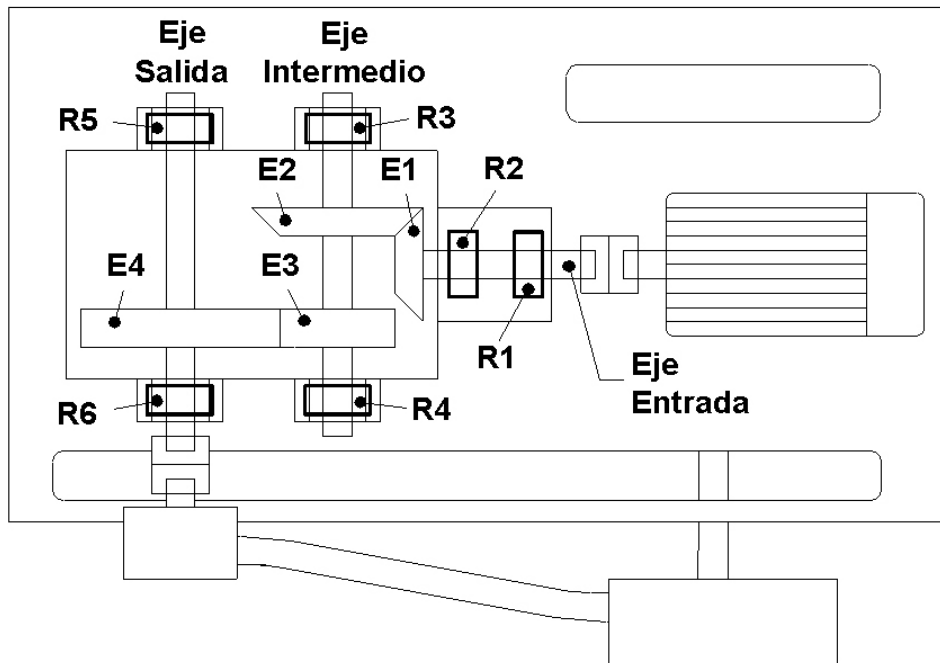


Figura 5.26.- Esquema de la caja de engranajes.

La caja de engranajes está compuesta por los siguientes elementos:

- Primer grupo reductor: es una pareja de engranajes cónicos a 90 grados, con tallado de dientes en espiral, con un número de dientes de  $Z1=15$  y  $Z2=60$ , de módulo  $m = 4$ . El eje de entrada lo constituye un eje- piñón (**E1**) mientras que el segundo engranaje (**E2**) está alojado en el eje intermedio.
- Segundo grupo reductor es una pareja de engranajes cilíndrico-helicoidales, con un número de dientes de  $Z3=22$  y  $Z4=65$ , de módulo  $m = 4$ . El piñón (**E3**) está insertado en el eje intermedio y la rueda (**E4**) en el eje de salida.
- Carcasa, compuesta de cárter y tapa extraíble.
- Alojamiento de rodamientos desplazables en las dos direcciones perpendiculares.
- Ejes intermedio y de salida con la posibilidad de acoplarles un motor y/o un freno.
- Elementos complementarios: juntas de estanqueidad, retenes, tornillos, tuercas, arandelas, carcasas, tapas, soportes, anillos, casquillos separadores, tuercas de fijación.



- **RODAMIENTOS:** Aunque existe la posibilidad de colocar otros tipos de rodamientos, en las tablas siguientes se incluyen las principales características de los rodamientos empleados en el banco de ensayos, según el eje en el cual se encuentran.

**- Eje de entrada:**

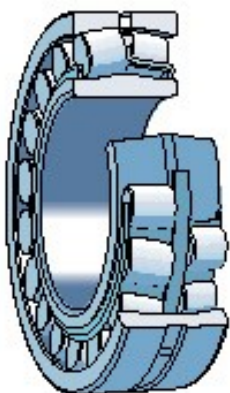
**R1** = SKF 3206 A. Rodamiento de bolas de contacto angular.



RODAMIENTO R1: SKF 3206ATN9	
TIPO	Rodamiento de bolas de contacto angular
Diámetro primitivo	46 mm
Número de elementos por hilera	9
Número de hileras	2
Ángulo de contacto	30 °
Diámetro del element	9.53 mm
Diámetro pista externa	62 mm
Diámetro pista interna	30 mm
Frecuencias de defecto para 3600 r.p.m.	
Pista interna	318.44 Hz
Pista externa	221.56 Hz
Jaula	24.62 Hz
Elemento rodante	280.29 Hz

Tabla 5.2.- Características básicas del rodamiento R1: SKF 3206ATN9.

**R2** = SKF 22308 EK. Rodamiento autoalineable, de doble fila de rodillos esféricos a rótula.

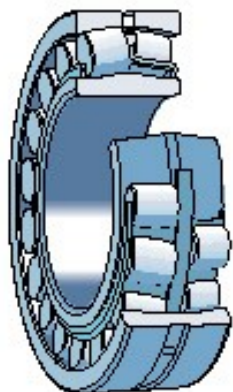


RODAMIENTO R2: SKF 22308E	
TIPO	Rodamiento autoalineable de doble fila de rodillos esféricos a rótula
Diámetro primitivo	65.46 mm
Número de elementos por hilera	13
Número de hileras	2
Ángulo de contacto	14.12 °
Diámetro del elemento	13.70 mm
Diámetro pista externa	90 mm
Diámetro pista interna	40 mm
Frecuencias de defecto para 3600 r.p.m.	
Pista interna	469.15 Hz
Pista externa	310.85 Hz
Jaula	23.91 Hz
Elemento rodante	274.88 Hz

Tabla 5.3.- Características básicas del rodamiento R2: SKF 22308E.

**- Eje intermedio:**

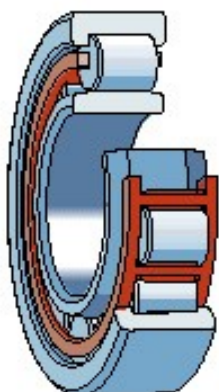
**R3** = SKF 22208 CC. Rodamiento autoalineable, de doble fila de rodillos esféricos a rótula.



RODAMIENTO R3: SKF 22208CC	
TIPO	Rodamiento autoalineable de doble fila de rodillos esféricos a rótula
Diámetro primitivo	60.90 mm
Número de elementos por hilera	16
Número de hileras	2
Ángulo de contacto	10.83 °
Diámetro del elemento	10 mm
Diámetro pista externa	80 mm
Diámetro pista interna	40 mm
Frecuencias de defecto para 3600 r.p.m.	
Pista interna	557.41 Hz
Pista externa	402.59 Hz
Jaula	25.16 Hz
Elemento rodante	355.90 Hz

Tabla 5.4.- Características básicas del rodamiento R3: SKF 22208CC.

**R4** = SKF NU208 EC. Rodamiento de rodillos cilíndricos.



RODAMIENTO R4: SKF NU208E	
TIPO	Rodamiento de rodillos cilíndricos
Diámetro primitivo	60.50 mm
Número de elementos por hilera	14
Número de hileras	1
Ángulo de contacto	0 °
Diámetro del elemento	11 mm
Diámetro pista externa	80 mm
Diámetro pista interna	40 mm
Frecuencias de defecto para 3600 r.p.m.	
Pista interna	496.36 Hz
Pista externa	343.64 Hz
Jaula	24.55 Hz
Elemento rodante	319.09 Hz

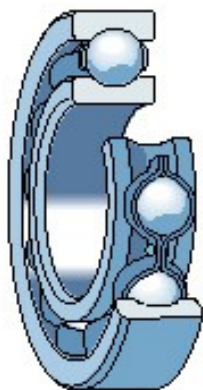
Tabla 5.5.- Características básicas del rodamiento R4: SKF NU208E.





- Eje de salida:

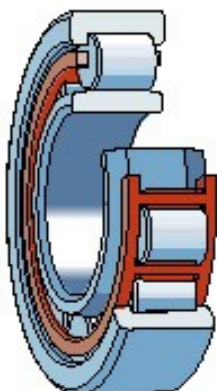
**R5** = SKF 6208. Rodamiento rígido de bolas.



RODAMIENTO R5: SKF 6208	
TIPO	Rodamiento rígido de bolas
Diámetro primitivo	60 mm
Número de elementos por hilera	9
Número de hileras	1
Ángulo de contacto	0 °
Diámetro del elemento	12.30 mm
Diámetro pista externa	80 mm
Diámetro pista interna	40 mm
Frecuencias de defecto para 3600 r.p.m.	
Pista interna	325.35 Hz
Pista externa	214.65 Hz
Jaula	23.85 Hz
Elemento rodante	280.38 Hz

Tabla 5.6.- Características básicas del rodamiento R5: SKF 6208.

**R6** = SKF NU208 EC. Rodamiento de rodillos cilíndricos.



RODAMIENTO R6: SKF NU208E	
TIPO	Rodamiento de rodillos cilíndricos
DIÁMETRO PRIMITIVO	60.50 mm
Número de elementos por hilera	14
Número de hileras	1
Ángulo de contacto	0 °
Diámetro del elemento	11 mm
Diámetro pista externa	80 mm
Diámetro pista interna	40 mm
Frecuencias de defecto para 3600 r.p.m.	
Pista interna	496.36 Hz
Pista externa	343.64 Hz
Jaula	24.55 Hz
Elemento rodante	319.09 Hz

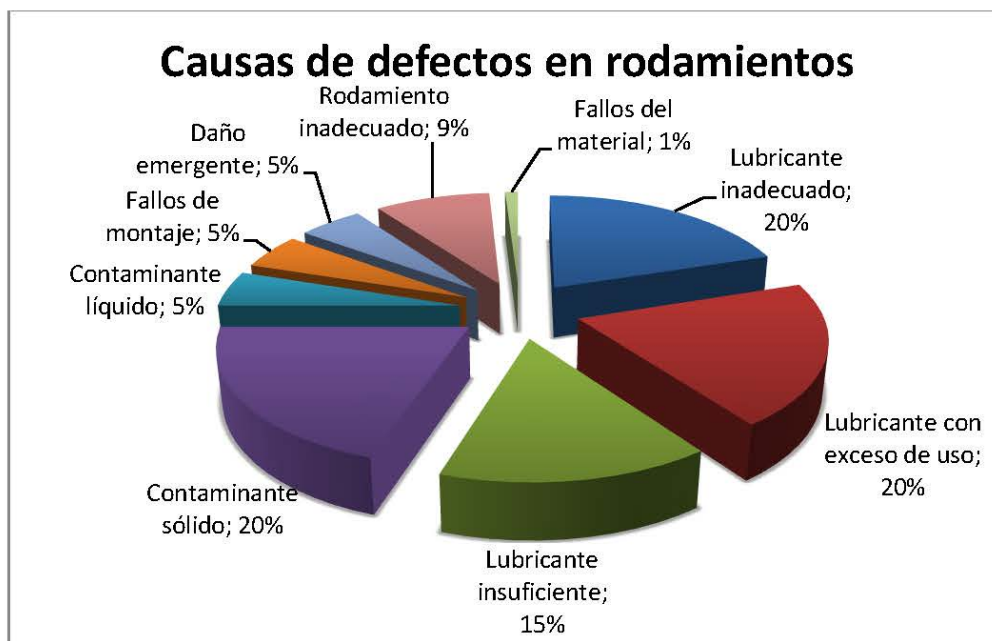
Tabla 5.7.- Características básicas del rodamiento R6: SKF NU208E.

## **2. DEFECTOLOGÍA EN RODAMIENTOS**

Los elementos más críticos en cualquier máquina rotativa son los cojinetes y rodamientos, pues sobre ellos descansa todo el peso del rotor, y soportan todos los esfuerzos dinámicos que se originan como consecuencia de desequilibrios, desalineaciones, excentricidades... Aunque son elementos mecánicos robustos, a menudo se les exige altas velocidades, altas cargas y fiabilidad, y por tanto presentan una alta sensibilidad al deterioro y suelen ser los primeros elementos que fallan.

En un rodamiento pueden darse defectos de muy distinta naturaleza, como son:

- Lubricación deficiente: insuficiente, inadecuada o con exceso de uso.
- Contaminación externa entre los elementos en contacto.
- Montaje, diseño o cálculo incorrecto.
- Fatiga superficial con formación de grietas o desprendimiento de material.
- Carga o vibración excesivas, ya sean estáticas o dinámicas.
- Paso de corriente eléctrica.



**Figura 5.27.- Principales causas de defectos en rodamientos. [P4]**





A pesar de ser elementos baratos en comparación con el valor de la máquina, un fallo no detectado en un rodamiento puede degenerar con cierta rapidez en una avería catastrófica (bloqueo del motor, contactos indeseados entre partes fijas y móviles, etc.), y además, la necesidad de desmontar casi completamente la máquina para su sustitución hace aún más interesantes la aplicación de técnicas predictivas para agotar al máximo posible la vida de los rodamientos (claro está, sin llegar a la zona de riesgo de fallo).

El defecto aumenta los niveles de temperatura, ruido y vibración del rodamiento y sus adyacencias, y algunos de estos defectos, individualmente o en conjunto, tienen un comportamiento evolutivo en el tiempo muy particular y específico, cuyo conocimiento sería especialmente importante a la diagnosis de los rodamientos. La técnica predictiva por excelencia para la detección de fallos en rodamientos es el análisis de vibraciones.

Cada avería primitiva del rodamiento genera su propio deterioro característico e imprime su particular huella en el rodamiento. Por ello, en la mayoría de los casos, examinando un rodamiento averiado es posible formar una opinión sobre la causa del fallo y adoptar la medida precisa para evitar su repetición.

Este daño primario da lugar a daños secundarios que inducen al daño más grave: desconchado y rotura. Frecuentemente, un rodamiento averiado ostenta una combinación de daño inicial y daño secundario.

Los diferentes tipos de daños que se producen en los rodamientos se pueden clasificar de la siguiente manera:

<b>Daño inicial o primario</b>	<b>Daño secundario</b>
Desgaste Muecas Adherencia Fatiga superficial Corrosión Daño por corriente eléctrica	Desconchado (descascarillado) Roturas

Tabla 5.8.- Principales daños producidos en rodamientos. [P2]



## DAÑO INICIAL O PRIMARIO

**DESGASTE:** En condiciones normales, no es apreciable; pero puede producirse por: presencia de partículas extrañas dentro del rodamiento, lubricación insatisfactoria o debido a vibraciones en rodamientos que permanecen estacionarios.

**MUESCAS:** suelen producirse por presión de montaje aplicada al aro equivocado que se transmite a través de los elementos rodantes: rodamiento sujeto a cargas anormales mientras no está girando, o partículas extrañas en el rodamiento.

**ADHERENCIAS:** se da cuando dos superficies lubricadas deslizan entre sí, bajo carga y el material se transfiere de una a otra provocando un desgarre de las superficies y un aumento de temperatura en la zona. Esto produce concentraciones de fatiga localizadas que pueden originar agrietamiento o desconchado.

En los rodamientos de rodillos el deslizamiento se produce principalmente entre superficies en el extremo de rodillo-pestaña de guía, cuando los rodillos están sometidos a una gran aceleración al entrar en la zona de carga, o si los aros giran respecto a su asiento en el eje o soportes.

En los rodamientos axiales de bolas, la adherencia puede ocurrir si la carga es demasiado ligera con relación a la velocidad de rotación.

**FATIGA SUPERFICIAL:** Si la película de lubricante entre los caminos de rodadura y los elementos rodantes llega a ser demasiado fina, las crestas de asperezas superficiales entrarán momentáneamente en contacto entre sí, y se producirán pequeñas grietas en la superficie. Aunque también las pueden generar, no deben confundirse con las grietas de fatiga que se originan debajo de la superficie y conducen al descascarillado.

**CORROSIÓN:** Si se introduce abundante agua o agentes corrosivos en el rodamiento, se formará óxido, y si no se resuelve a tiempo generará zonas de óxido profundo. También se puede producir oxidación de contacto.

**AVERÍA PRODUCIDA POR PASO DE CORRIENTE ELÉCTRICA:** El paso de corriente eléctrica de un aro a otro a través de los elementos rodantes, es similar al de la soldadura por arco eléctrico y esto provoca que el material se caliente alcanzando niveles de temperaturas desde temple hasta fusión. Por tanto, aparecen áreas descoloridas donde el material ha sido templado, revenido o fundido, formándose también pequeños cráteres.



## DAÑO SECUNDARIO

**DESCONCHADO O DESCASCARILLADO:** La principal causa de defectos en rodamientos es el fenómeno conocido como “flacking” o “spalling” (descascarillado o desconchado). Los esfuerzos excesivos que se dan de forma prolongada y la fatiga en las superficies de contacto causan grietas superficiales. Conforme los elementos rodantes alcanzan los fragmentos agrietados del material, estos rompen; el desconchado se incrementa progresivamente en extensión y finalmente deja del rodamiento inservible. El defecto anuncia su presencia por el incremento de los niveles de ruido y vibración, y por tanto hay cierto tiempo para efectuar un cambio de rodamiento.

Las causas de un desconchado prematuro pueden ser unas cargas externas demasiado elevadas, precargas a causa de ajustes incorrectos, excesivo calado en asiento cónico, ovalidad debida a error de redondez del asiento en eje o alojamiento, compresión axial como resultado de dilatación térmica, etc. También puede estar causado por muescas, corrosión profunda, corriente eléctrica perjudicial o adherencias.

**GRIETAS:** La causa más común es un trato brusco cuando el rodamiento está siendo montado o desmontado: los golpes de mazo, aplicados directamente contra el aro o mediante un botado templado, pueden originar la formación de fina grietas.

Otra causa del agrietamiento puede ser: problemas en el calado excesivo sobre asiento cónico o manguito, rodamientos montados en caliente con tolerancias no adecuadas, adherencias, corrosión por contacto.

**AVERÍAS DE LA JAULA:** Aunque suele ser difícil determinar la causa, se pueden generar grietas en la jaula por: vibraciones, velocidad excesiva, desgaste (presencia de partículas o falta de lubricación) y gripado.



### **3. COMPORTAMIENTO VIBRATORIO DE LOS RODAMIENTOS CON DEFECTOS LOCALIZADOS**

A la hora de estudiar estas señales vibratorias cabe preguntarse si se debe realizar este análisis en el dominio del tiempo o de la frecuencia: en el dominio del tiempo se pueden obtener valores como la desviación típica y la Kurtosis de la señal, pero estas magnitudes no ofrecen información alguna sobre las frecuencias que tiene la señal generada por las vibraciones de los rodamientos; por este motivo es conveniente realizar el análisis en el dominio de la frecuencia.

La principal característica de un rodamiento es que la distribución de cargas varía con el movimiento de los elementos rodantes, y hace que los rodamientos se comporten como generadores de vibraciones, incluso sin defecto. La presencia de defectos hará que ciertas frecuencias se amplifiquen. [R6, R7]

La vibración generada en los rodamientos es causada por la variación de la compliancia (relación desplazamiento/fuerza) o por la presencia de defectos distribuidos o locales. Por tanto, los defectos en los rodamientos se pueden clasificar en: [R7]

1. Defectos distribuidos: incluyen rugosidad superficial y ondulaciones en las pistas, pistas desalineadas y elementos rodantes de tamaños o geometrías defectuosas. Estos defectos suelen deberse a errores de fabricación o a una inadecuada instalación. La variación de las fuerzas de contacto entre los elementos rodantes y las pistas causa un incremento en el nivel de vibración.
2. Defectos localizados: el defecto se encuentra en una posición bien definida en alguno de los componentes del rodamiento (anillo interno, anillo externo o en los elementos rodantes). Abarcan las grietas, pitting y la formación de hoyos o picaduras, siendo estos últimos los que predominan. El defecto originado por una grieta de fatiga bajo la superficie del elemento y se propaga hasta que arranca una lámina de metal en el exterior, formando así un hoyo. El fallo por fatiga se ve favorecido cuando el rodamiento está sobrecargado o soporta cargas de impacto durante su funcionamiento o instalación.

Cuando un elemento rodante pasa sobre un defecto local, da origen a una fuerza impulsiva que genera una vibración. Mediante un análisis de la misma, se puede detectar la presencia de dicho defecto.

Cuando el defecto se encuentra en su estado incipiente, estas fuerzas impulsivas, contienen muy poca energía, pues se trata de impulsos de muy corta duración, aunque las amplitudes de la vibración pueden llegar a ser relativamente elevadas. La detección de un defecto en un rodamiento a partir de la señal de vibración generada por una máquina en funcionamiento presenta cierta complejidad respecto a otros defectos como desequilibrios, desalineamientos, holguras, etc. ya que presentan un menor intercambio de energía.

### 3.1. FRECUENCIAS ROTACIONALES

En la ilustración se puede observar la relación de velocidades relativas entre los elementos móviles del rodamiento.

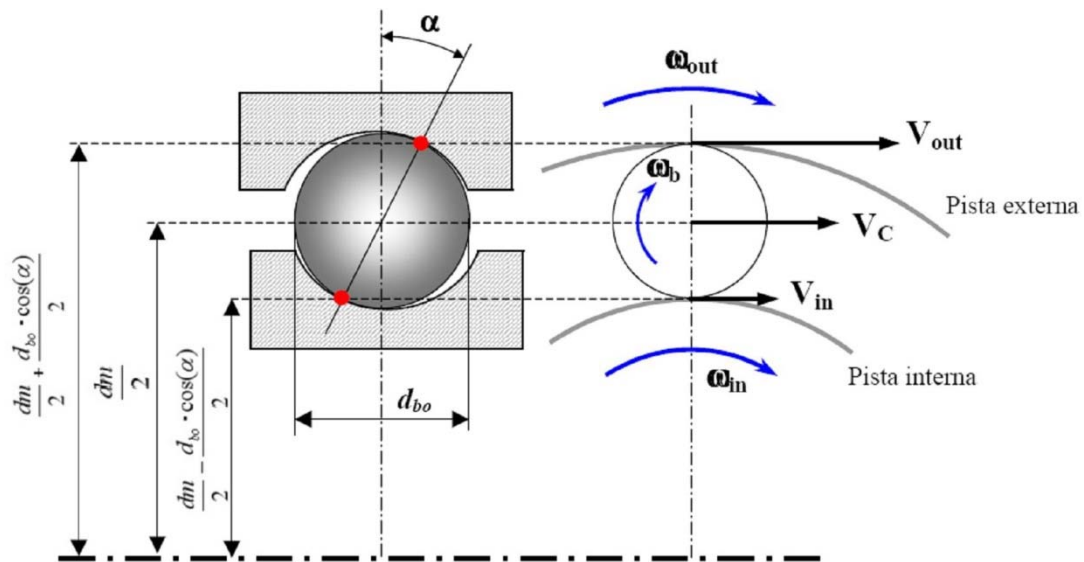


Figura 5.28.- Parámetros cinemáticos del rodamiento. [T5]

Cuando un rodamiento tiene un defecto, en su espectro de frecuencias aparecen grandes amplitudes a unas frecuencias muy bien definidas. En principio, estas frecuencias dependen de unas características propias del rodamiento, como son el número de elementos rodantes y las dimensiones de los elementos del rodamiento y de las condiciones de funcionamiento.

Un defecto en cualquiera de estas partes produce una vibración característica fácilmente detectable en un espectro de frecuencia. Estas frecuencias de fallo del rodamiento dependen de dos factores: la velocidad de giro y los parámetros geométricos del rodamiento (diámetros primitivo, exterior e interior, diámetro de los

elementos rodantes, número de elementos rodantes y ángulo de contacto entre las pistas y los elementos rodantes), y vienen dadas por unas fórmulas matemáticas.

En función de la parte del rodamiento afectada, pueden definirse hasta cuatro frecuencias características, en función de los parámetros cinemáticos del rodamiento antes reseñados:

**BPFO** (Ball Pass Frequency Outer race; frecuencia de paso de bola, anillo exterior)

$$BPFO = \frac{Z \cdot \varpi_{in}}{2} \cdot \left( 1 - \frac{d_{b0} \cdot \cos(\alpha)}{dm} \right)$$

**BPFI** (Ball Pass Frequency Inner race; frecuencia de paso de bola, anillo interior)

$$BPFI = \frac{Z \cdot \varpi_{in}}{2} \cdot \left( 1 + \frac{d_{b0} \cdot \cos(\alpha)}{dm} \right)$$

**BSF** (Ball Spin Frequency, frecuencia de rotación de bola)

$$BSF = \frac{d_m \cdot \varpi_{in}}{2 \cdot d_{b0}} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{d_{b0} \cdot \cos(\alpha)}{dm} \right)^2 \right]$$

**FTF** (Fundamental Train Frequency, frecuencia fundamental de tren)

$$FTF = \frac{\varpi_{in}}{2} \cdot \left( 1 - \frac{d_{b0} \cdot \cos(\alpha)}{dm} \right)$$

Estas frecuencias son importantes, ya que nos indicarían la presencia de un tipo de defecto en caso de análisis estacionario simplemente analizando el espectro de frecuencias. Sin embargo en caso de un análisis transitorio estas frecuencias varían linealmente con la velocidad, y en principio no nos serán de gran utilidad a la hora de clasificar las señales.



**Figura 5.29.- Rodamientos con defectos en pista interna. [T4]**



Figura 5.30.- Rodamientos con defecto en pista externa. [T4]

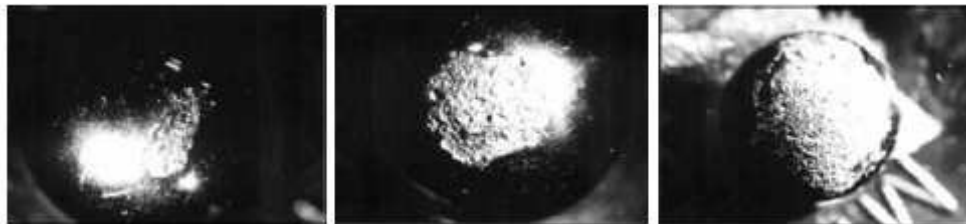


Figura 5.31.- Rodamientos con defecto en bola. [T4]

### 3.2 ESPECTRO DE DEFECTOS

En el espectro de potencia de la señal de vibración generada por un rodamiento, pueden distinguirse cuatro zonas características:

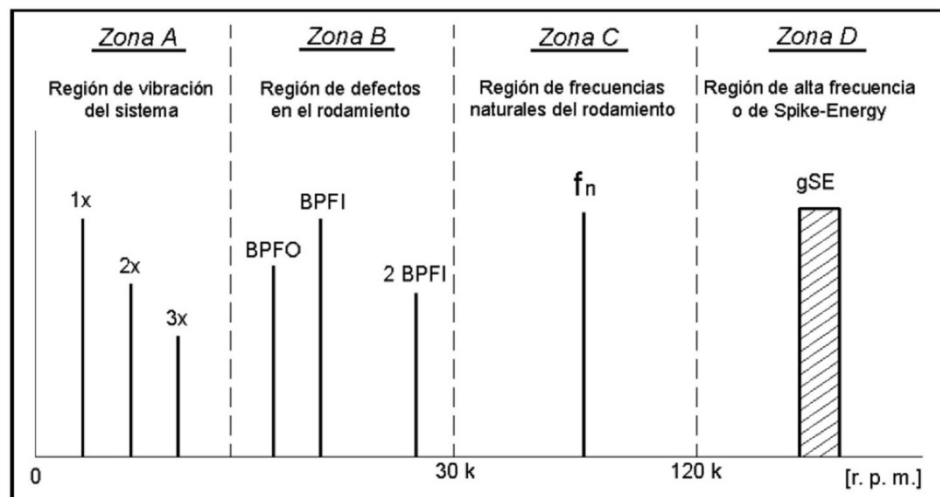


Figura 5.32.- Espectro de frecuencia característico de la vibración generada por un rodamiento con defectos. [T3]

Las características propias de cada zona son las siguientes:



- **Zona A**

**Región de la vibración del sistema.** Las vibraciones ligadas a anomalías tales como el desequilibrios, el des-alineamiento o la inestabilidad dinámica del rotor se sitúan en un rango de frecuencia comprendido entre 0.25 y 3 veces la velocidad de rotación del eje de la máquina. Algunas de ellas pueden derivar de un deterioro en los rodamientos, ya que el desgaste o la holgura en los rodamientos producen excentricidad en el eje.

- **Zona B**

**Región de los defectos en el rodamiento.** Esta banda corresponde al rango de frecuencias comprendidas entre la frecuencia de paso de elemento rodante (número de veces que un elemento rodante pasa por un punto de la pista interior o exterior) y siete veces esta frecuencia. Representa la banda que aporta mayor cantidad de información sobre el estado de deterioro de los rodamientos. En ella aparecen reflejadas las frecuencias generadas por los defectos en el rodamiento. El 90 por ciento de los fallos de los rodamientos se deben a grietas en los elementos rodantes, pista de rodadura interna o externa, que generan frecuencias en esta banda. El 10 por ciento restante son producidas por grietas en la caja de los rodamientos y dan lugar a frecuencias en la región de vibración del rotor.

- **Zona C**

**Región correspondiente a las frecuencias naturales de los componentes de los rodamientos.** Las medidas realizadas en esta región deben ser complementadas con medidas en las otras regiones ya que son más fiables. Esta zona nos proporciona una idea sobre el estado del defecto pero debemos complementarlas con las tomadas en las regiones anteriores para tener información de la naturaleza del defecto.

- **Zona D**

**Región de alta frecuencia o de Spike Energy.** Esta región cubre el rango de frecuencias más elevado. Esta región nos proporciona una clara idea de la evolución del defecto junto con una pronta identificación del defecto ya que es la primera zona en la que se advierten estos deterioros incipientes. El problema de esta zona es que es una región ultrasónica y requiere de un sensor especialmente diseñado para detectar frecuencias muy altas. Circuitos de filtros especiales dejan pasar sólo esta región de frecuencia.



### 3.3. EVOLUCIÓN ESPECTRAL DEL DESARROLLO DE LOS DEFECTOS

Para tratar de ilustrarlo, la evolución en el caso de una fisura suele ser:

- **Estado I**

El primer síntoma que aparece cuando el fallo está en un estado incipiente es una vibración con componentes de alta frecuencia (habitualmente superiores a 5 kHz). En este estado, el rodamiento todavía dispone de vida remanente considerable (en torno al 10 o 20 por ciento).

Los defectos suelen ser picaduras, las mayorías microscópicas, difíciles de identificar al tacto o visualmente, sólo identificables al microscopio. Además, no se generará ruido perceptible por el oído humano ni la temperatura se elevará significativamente.

Para este estado, el único indicador del defecto es el marcado incremento de los valores globales del Spike-Energy (SE) o pico de energía (aparecen algunos picos en la región de alta frecuencia), ya que el espectro es normal (como el de un rodamiento nuevo) y no se refleja el defecto en él. Normalmente, el Spike-Energy (S.E.) incrementa su valor desde un nivel de 0,02- 0,04 gSE que presenta en rodamientos nuevos hasta un nivel de 0,15-0,25 gSE.

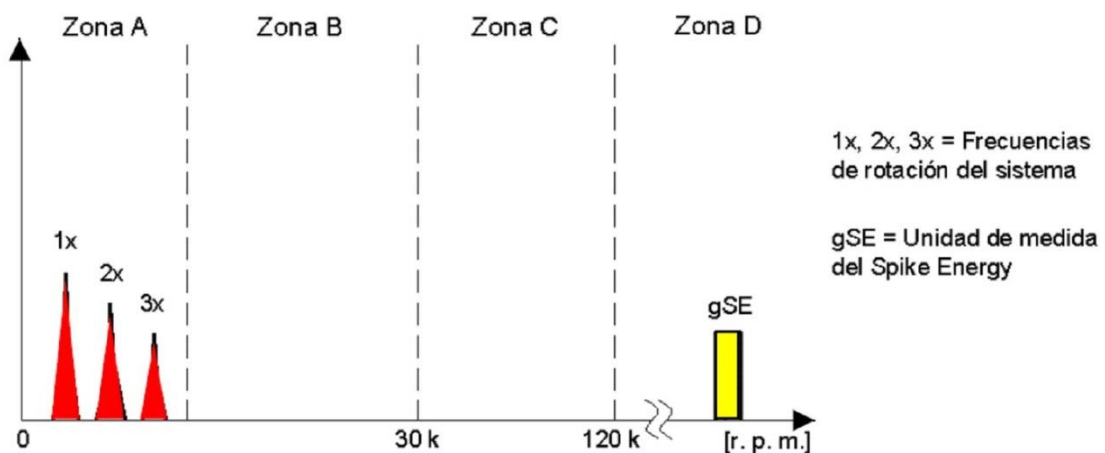


Figura 5.33.- Espectro representativo del estado I de la evolución del defecto en el rodamiento. [T5]

### • Estado II

En un segundo estado, la grieta comienza a ser visible y el rodamiento produce un sonido audible y en algunos casos la temperatura aumenta. En este estado aparecen componentes espectrales en un rango de frecuencias bajas e intermedias (menos de 5 kHz), las frecuencias características de defecto. Estas frecuencias, para el caso particular de los rodamientos de bola, pueden clasificarse en función de donde se produce el defecto.

Cuando llega a este estado, el rodamiento dispone del 5-10 por ciento de vida remanente.

Los defectos consisten en picaduras no visibles sin la ayuda de una lente de aumento o microscopio. Se observa un ligero incremento del ruido pero la elevación de la temperatura es prácticamente inapreciable.

La aparición de estos pequeños defectos en el rodamiento repercute en el espectro, comenzando a excitarse las frecuencias de resonancia de los componentes del rodamiento y de su soporte que se concentrarán, aproximadamente, en el rango de frecuencias de 500-2000 Hz.

En este estado debe programarse el cambio de los rodamientos.

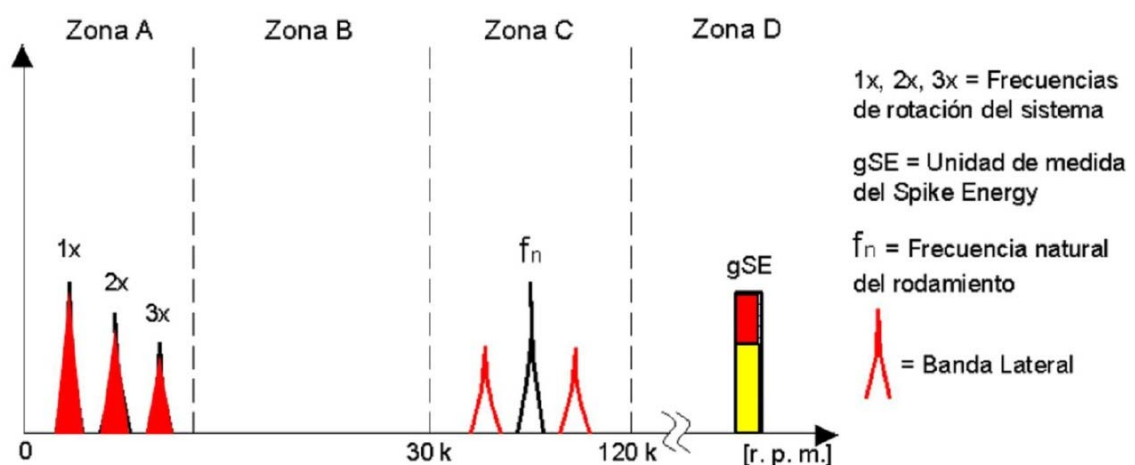


Figura 5.34.- Espectro representativo del estado II de la evolución del defecto en el rodamiento. [T5]



Las frecuencias naturales de la mayor parte de los rodamientos montados en su soporte suelen estar entre los 850 y 1700 Hz, y su ubicación frecuencial no varía con la velocidad, aunque sí la amplitud, puesto que a mayor velocidad de rotación la energía intercambiada en los impactos es más elevada. La respuesta en la zona de Spike-Energy también se ve afectada con un aumento de valor y, en algunos casos, se incrementa hasta duplicarse.

Al inicio del estado 2, normalmente, sólo aparecerán en el espectro una o más frecuencias discretas en la zona antes delimitada para las frecuencias de resonancia.

Sin embargo, hacia el final del estado 2, dichas frecuencias conservarán la misma amplitud pero estarán moduladas a la velocidad de giro del rodamiento, tanto más cuanto el defecto vaya progresando en su deterioro, lo que se hace patente en el espectro por la aparición de bandas laterales alrededor de la frecuencia de resonancia, con un desplazamiento arriba y abajo de la frecuencia de resonancia de 1 x r.p.m., o, más raramente, dicho desplazamiento toma el valor de la frecuencia de defecto en pista interior (BPFI) o exterior (BPFO).

### • Estado III

En este estado, el rodamiento dispone del 2-5 por ciento de vida remanente. Los defectos consisten en picaduras claramente visibles y relativamente profundas. El ruido es evidente y la temperatura se incrementa ligeramente. La respuesta del Spike- Energy continuará incrementándose, duplicándose e incluso triplicándose en amplitud, llegando incluso a valores de 30-50 veces más altos que los se obtenían cuando el rodamiento se colocó nuevo.

Por primera vez aparecen frecuencias fundamentales asociadas con los defectos (BPFI, BPFO, BSF y FTF) y, a medida que avanza en el estado 3, van apareciendo armónicos de dichas frecuencias según progresa el desgaste alrededor de la periferia de la pista y aparecen defectos en los elementos rodantes.

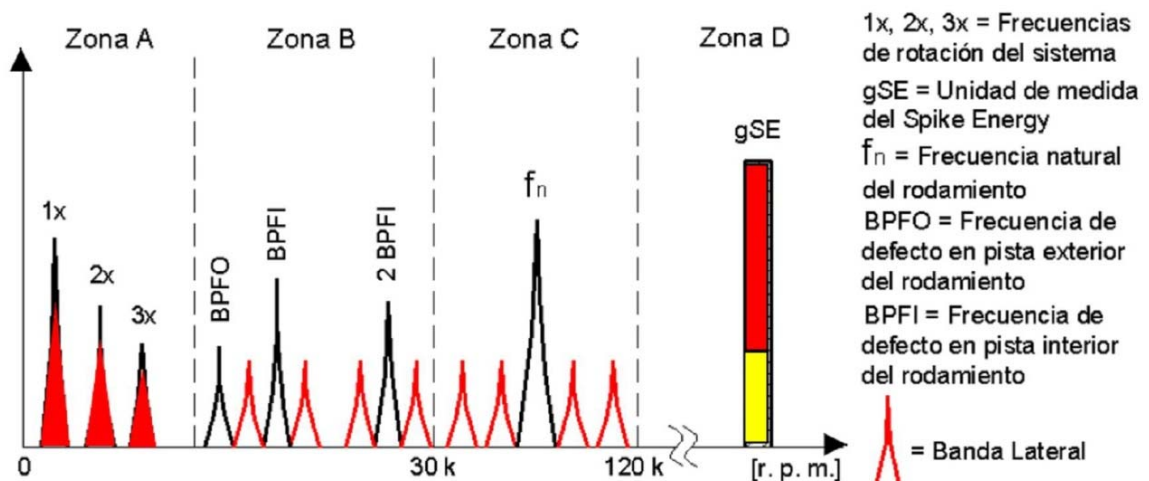


Figura 5.35.- Espectro representativo del estado III de la evolución del defecto en el rodamiento. [T5]

Al principio las frecuencias de defecto no serán moduladas por la velocidad de rotación, pero según progresa el desgaste, comienzan a aparecer bandas laterales alrededor de las frecuencias de defecto y sus armónicos, e incluso alrededor de las frecuencias de resonancia. En el final del estado 3, se encuentra el rodamiento en la parte exponencial de su curva de desgaste, por lo que la velocidad de desgaste es impredecible y su duración estará condicionada por las condiciones de funcionamiento tales como la lubricación, las cargas, temperatura, etc. Mejorar la lubricación en este extremo disminuye momentáneamente el nivel global de vibración (reducción del ruido), pero volverá a niveles normales a las 12-24 horas. La adición de un exceso de lubricante es contraproducente y podría acelerar el fallo.

Llegados a este punto, debería reemplazarse el rodamiento.

#### • Estado IV

El rodamiento se acerca a la situación de fallo catastrófico o colapso, dispone de una vida remanente de un 1 por ciento. Se puede apreciar en el rodamiento un pronunciado desgaste por toda la periferia de la pista de rodadura. El ruido se incrementa notablemente y hay un significativo aumento de temperatura.

En el estado 4, aparecen gran cantidad de bandas laterales a una distancia de 1x r.p.m. alrededor de las frecuencias de defecto. La amplitud de la componente a 1x r.p.m., normalmente, comienza a incrementarse por primera vez a lo largo de todo el proceso descrito, así como sus armónicos 2º y 3º.

El nivel de Spike-Energy no se eleva sino que decrece, y las amplitudes de los armónicos más altos de las frecuencias de defecto y de las de resonancia también decrecerán, tendiendo a "desaparecer", son sustituidos por otros armónicos aleatorios.

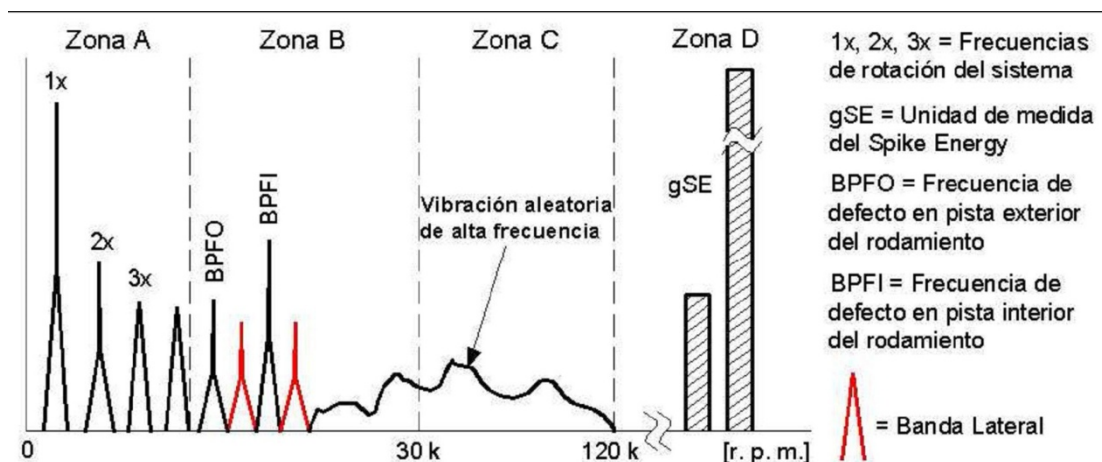


Figura 5.36.- Espectro representativo del estado IV de la evolución del defecto en el rodamiento. [T5]

Al final del estado 4, el nivel de Spike-Energy se reduce todavía más y justo antes del colapso crecerá drásticamente hasta valores muy elevados (50-100 gSE). A medida que este estado avanza, comienzan a desaparecer del espectro las frecuencias de defecto y las frecuencias de resonancia, apareciendo muchas componentes a frecuencias aleatorias que se extienden por el espectro y camuflan los picos de las frecuencias discretas.

Llegados a este punto, al rodamiento pueden quedarle una hora o una semana de vida, depende de diferentes factores operativos.



#### **4. MODELOS DE VIBRACIONES POR DEFECTOS EN RODAMIENTOS**

Para intentar comprender todos los fenómenos generados en los rodamientos se recurre a los modelos empíricos (derivados de procesos estadísticos) o a modelos matemáticos (de parámetros distribuidos o concentrados) aunque estos últimos poco generales (CAO). En la actualidad se contemplan, sobre todo, modelos que consideren los efectos dinámicos de los rodamientos, superadas las técnicas cuasi-estáticas de JONES, HARRIS ó PALMGREN.

##### **1. Reseña histórica sobre Modelos para el análisis en rodamientos**

Hacia 1970, MARTIN, basándose en la geometría de los rodamientos, desarrolla el cálculo teórico de las frecuencias rotacionales de defectos en rodamientos y posteriormente, BRAUN especifica los modelos matemáticos de defectos en rodamientos, basados en la modulación producida por dichos defectos sobre la frecuencia de resonancia de los elementos que componen el rodamiento (pistas, bolas, rodillos, etc.). Después, BERRY expone los modelos de espectros de cuatro estados de evolución de dichos defectos.

Respecto a la simulación del comportamiento de los rodamientos, se puede señalar que modelos teóricos que emulen la dinámica de los rodamientos de bolas ha habido muchos, principalmente desde finales de la década de los 70: WESING, en su tesis, compara los diez más eficientes que se pueden encontrar en la literatura de los últimos 20 años, aportando además, en colaboración del DIETL, el cálculo del coeficiente de amortiguamiento de un rodamiento en condiciones elastohidrodinámicas. SARANGI plantea un modelo analítico de rodamiento con contacto elastohidrodinámico considerando rigidez y amortiguamiento en condiciones de lubricación adecuada.

Entre los muchos modelos del comportamiento de los rodamientos conviene reseñar también a WALTERS, que desarrolla un modelo analítico dinámico para rodamiento de bolas con jaula donde se contempla el deslizamiento entre bola y pista de rodadura y que, más tarde, sería modificado por GUPTA, y posteriormente actualizado en trabajos de TIWARI.

Sin embargo, las soluciones aportadas a los modelos de WALTERS, GUPTA y TIWARI, con la integración de las ecuaciones planteadas en los contactos y las fuerzas, conllevan unos tiempos de computación excesivamente largos y se originan errores computacionales debido a la truncación numérica por computador. KENNEL y



BUPARA desarrollan un modelo simplificado para analizar la dinámica de las bolas y la jaula donde se asume que el conjunto jaula-bolas sólo se mueve en el plano de su diámetro principal. MEEKS mostró que los movimientos del conjunto jaula-bolas son demasiado complicados para ser modelados con esta simplificación extrema del movimiento de la jaula.

GAD y FUKATA afrontaron el estudio de las vibraciones resultado de la respuesta dinámica no lineal en rodamientos de bolas que soportan un rotor horizontal equilibrado sobre el que actúa una fuerza vertical constante, considerando el efecto de flexibilidad variable. También muestran que la resonancia ocurre cuando BPF (ball passage frequency) coincide con la frecuencia del sistema y también apuntan que, para ciertas velocidades, el sistema eje-bolas-soporte puede generar vibraciones con subarmónicos y superarmónicos de BPF.

MEEKS y TRAN desarrollan un modelo analítico para estudiar y optimizar los parámetros de diseño de la jaula y de los arcos de soporte. AKTÜRK realiza una investigación teórica del efecto de la variación de la precarga en las características vibratorias de un sistema eje-rodamiento y también sugieren que tomando el número de bolas adecuado y el valor de precarga se puede reducir la generación de vibraciones a BPF. RAHNEJAT y GOHAR muestran que incluso con lubricación elastohidrodinámica entre bolas y pistas, aparecen los picos de BPF en el espectro.

HARSHA sigue la línea abierta por GUPTA, TIWARI y PRAKASH, comprobando las afirmaciones de los autores precedentes y desarrollando modelos analíticos para predecir la respuesta dinámica no-lineal de sistemas rotor-rodamiento considerando: el rotor horizontal y equilibrado; o un número de bolas variable; u ondulaciones superficiales en la pista exterior o interior; o el efecto precarga; o el efecto de “run-out” de la jaula.

Planteados los modelos del sistema rotor-rodamiento, para la resolución iterativa de las ecuaciones diferenciales dice que utiliza la técnica de integración numérica de Newmark-B combinada con el método de Newton-Raphson. También otros autores, como PUROHIT, han presentado modelos analíticos de rodamiento similares a los de HARSHA, reduciendo los grados de libertad del modelo.

Son muchos los investigadores que ha realizado modelos o planteado soluciones sobre la distribución de esfuerzos en los rodamientos, con modelos de parámetros concentrados (FENG), donde merecen ser reseñados software como BEAST o BRAIN



como herramienta de simulación dinámica de rodamientos desarrollados bajo el auspicio de grandes fabricantes de rodamientos (SKF, NSK,...), con modelos implementados utilizando BOND GRAPH, como BHATTACHARYYA, y con modelos de parámetros distribuidos pero en condiciones estáticas. (KANG y ZHANG)

La aplicación a modelos de rodamientos de parámetros distribuidos de programas informáticos como ALGOR o ADAMS, que combinan modelado de elementos finitos y modelado de condiciones dinámicas parecen abrir un nuevo camino en esta vía, como elemento de contraste. (GARCÍA y RUBIO, 2002)

Sin embargo, no hay ningún modelo teórico que incluya todos los aspectos principales que condicionan la dinámica de los rodamientos de bolas: si modelan la jaula, no consideran el efecto de la lubricación; o si consideran los dos aspectos anteriores no incluyen en el modelo la flexibilidad de los anillos.

Especial interés, en el comportamiento del rodamiento, es su particular tipo de lubricación (elastohidrodinámica o EHD) donde merecen destacarse los estudios de modelado EHD en rodamientos, formulados en 1999 por MORALES Y QUIÑONES, y NELIAS.

## **2. Características de los modelos para el análisis de defectos en rodamientos**

A continuación se expondrán ciertas características fundamentales que suelen presentar los modelos para el análisis de defectos, que han de ser tenidos muy en cuenta a la hora de evaluar los defectos en rodamientos: [T2, T3]

### 1.-Diferencia de las frecuencias rotacionales de defecto, de otras frecuencias

A diferencia de otras frecuencias (de engrane, desequilibrios, desalineamientos, etc) que aparecen siempre, con defecto o sin él, cuando se detecta en un espectro una variación de amplitud o una amplitud relativamente elevada a una frecuencia rotacional, se debe pensar en la presencia de un defecto o problema incipiente.

### 2.- Frecuencias rotacionales de defectos a múltiplos no enteros de la velocidad de rotación

El cálculo de las frecuencias rotacionales de los rodamientos mostrará que son múltiplos no enteros de la velocidad de rotación del eje, siendo una de las pocas fuentes de vibración en que esto ocurre.





### 3.-Amplitudes relativas entre pista exterior y pista interior

La amplitud de la componente a la frecuencia de defecto de pista exterior es más elevada que la correspondiente a la pista interior, dado que el transductor que recoge la señal se encuentra más próximo a la pista exterior que interior.

### 4.- Orden de aparición de los defectos

Normalmente, los defectos aparecerán en primer lugar en las pistas, extendiéndose más adelante a los elementos rodantes y a la jaula, por lo que las componentes a la frecuencia de defecto de pista externa o interna aparecerán en el espectro antes que las correspondientes a los elementos rodantes y jaula.

Las frecuencias de defecto en jaula suele aparecer como frecuencia fundamental, o como banda lateral de otra frecuencia. La correspondiente al elemento rodante puede aparecer como banda lateral asociada a la frecuencia de defecto en pista exterior o interior.

### 5.- Frecuencia de defecto en jaula

La componente de la frecuencia fundamental de defecto en jaula siempre será subsíncrona y aparecerá normalmente como bandas laterales de la frecuencia de paso de bola o de una de las frecuencias de defectos de pistas.

### 6.- Frecuencias generadas cuando la jaula está rota

Una jaula rota en un remache con la bola empujando fuertemente contra la jaula puede generar la frecuencia de defecto de elemento rodante.

### 7.- Frecuencia de defecto en elementos rodantes

Cuando se produce un defecto en un elemento rodante, se generarán componentes en la frecuencia de elemento rodante (BSF), y también a la frecuencia en jaula (FTF).

### 8.- Frecuencias generadas en caso de defectos en más de un elemento rodante.

Si existen defectos en más de un elemento rodante, se generarán frecuencias igual al número de elementos rodantes con defecto por el valor de la frecuencia asociada al defecto en elemento rodante.



#### 9.- Grado de severidad de la vibración a las frecuencias de defectos.

La severidad de una vibración a las frecuencias rotacionales de defecto en rodamientos no se puede medir por los niveles de amplitud, sino por el N° de armónicos de dichas frecuencias presentes en el espectro.

En general, se puede permitir un nivel de vibración más elevado a la frecuencia de 1 x rpm que a las frecuencias rotacionales de defecto.

#### 10.- Localización del transductor

Es de vital importancia la situación del transductor, tan próxima como sea posible a la zona de carga del rodamiento, sobre todo cuando la carga del rodamiento sea exclusivamente radial.

#### 11.- Errores debidos a las variaciones de velocidad

Las fluctuaciones de velocidad que se producen en las máquinas causarán, al mismo tiempo, variaciones en las frecuencias espectrales y en las amplitudes.

#### 12.- Suma y diferencia de frecuencias

A continuación se resumirán aquellos aspectos más importantes relativos a la suma y diferencia de frecuencias:

- La frecuencia fundamental de defecto en elementos rodantes (BSF), suele localizarse como bandas laterales de otras frecuencias.
- Si el rodamiento tiene un único defecto en pista interior ó exterior, aparecerá la correspondiente frecuencia fundamental; sin embargo, cuando el defecto avanza y empieza a extenderse por la periferia de la pista, comenzarán a aparecer en el espectro un número de armónicos de la frecuencia fundamental.
- Un defecto en las pistas, hará crecer en la amplitud a las frecuencias de defecto.
- En el análisis de vibraciones de rodamientos, la característica que más pesa en la evaluación del estado de los mismos es el contenido espectral. La abundancia en el espectro de armónicos de las frecuencias de defecto y de bandas laterales es por tanto el mejor indicador de defectos en los rodamientos.



- En los rodamientos con 2 hileras de elementos rodantes, se pueden generar dos juegos de frecuencias de defectos:

1.- Si el defecto se encuentra situado en un único lado de la pista, las frecuencias de defecto (BPFO, BPFI, BSF) generadas se calcularían usando el número de elementos rodantes situados en una sola pista.

2.- Si el defecto se extiende a ambas pistas, dichas frecuencias se calcularían tomando el número de elementos rodantes contenidos en las dos pistas.

- Un defecto aislado sobre la pista interior de un rodamiento, puede ser difícil de diagnosticar a partir del espectro de frecuencia, dado que su amplitud será muy pequeña, y la línea espectral correspondiente estará “tapada” por el ruido.

### **3. Modelos de distintos defectos en rodamientos**

El hecho de que la distribución de cargas varíe conforme los elementos rodantes giren sobre los anillos causa que los rodamientos se comporten como generadores de vibraciones, incluso aunque éstos no tengan ningún defecto. Sin embargo, la presencia de defectos hace que ciertas frecuencias se amplifiquen.

Sin embargo, no todas estas frecuencias se identifican en el espectro de una forma sencilla, debido a fenómenos tales como poca energía en juego, ruido excesivo, enmascaramiento por interferencias, por variaciones de velocidad, por deslizamiento de los elementos rodantes, etc.

Así pues, en la práctica, estas frecuencias son muy difíciles de detectar puesto que están "tapadas" por el ruido, a menos que el nivel de ruido sea bajo y la señal de defecto sea elevada, lo que no suele ocurrir a menudo.

La observación del espectro en el dominio de las altas frecuencias, definido como el área del espectro donde dominan las resonancias estructurales, proporcionará una excelente información acerca de los defectos incipientes en rodamientos, puesto que los estrechos pulsos producidos por ejemplo en una pequeña grieta en una de las pistas, transmitirá energía a las frecuencias naturales de la estructura, posibilitando así que los defectos pueden ser detectados, ya que no están tapados



por las señales de elevada energía existentes en el lado de las bajas frecuencias del espectro.

### -Frecuencias de resonancia y modulación

Normalmente un defecto incipiente en un rodamiento consiste en una grieta o picaduras (hoyos ó cráteres) en la pista interior, exterior o en el elemento rodante.

Estos defectos generarán pequeños impulsos cada vez que los elementos rodantes pasen sobre ellos, transmitiendo energía a cada una de las partes de que se compone el rodamiento y también a los soportes de los mismos, excitando sus correspondientes resonancias, lo que dará lugar a una serie de trenes cortos de vibraciones (fuertemente amortiguadas debido a que el rodamiento está sujeto a la estructura) a frecuencias elevadas (frecuencias de resonancia).

### -Modelo matemático para defectos localizados

La interrelación entre frecuencias de defectos, frecuencias de resonancia, y modulaciones se pueden plasmar en un modelo analítico.

Su interpretación física es bien sencilla, ya que se trata de una serie de excitaciones periódicas a la frecuencia de impacto con los defectos localizados, siendo su efecto realizado alrededor de las frecuencias de resonancia, es decir, en una región donde las frecuencias son de varios órdenes de magnitud superiores a la frecuencia de impacto, siendo alrededor de las frecuencias estructurales donde estos componentes se amplificarán significativamente.

### -Modelo matemático para defectos distribuidos

Los defectos distribuidos están generalmente relacionados con la calidad del rodamiento, en cuanto se refiere a su fabricación y/o a su montaje, y afectarán significativamente a la vida de los mismos.

La falta de redondez de las pistas, elementos rodantes diferentes, etc. son defectos incluidos dentro de esta categoría.



-Modelo relacionado con un montaje inadecuado del rodamiento

Cuando el rodamiento se monta incorrectamente, como por ejemplo, cuando se instala con un apriete excesivo en un soporte, se produce una precarga en el mismo, originada por la reducción de las holguras internas del rodamiento y forzando los elementos rodantes contra las pistas, lo que generará frecuencias de paso de bola sobre la pista exterior y/o interior. Lo mismo ocurre en el caso de rodamientos axiales con precarga excesiva de montaje.

-Modelo correspondiente al giro de la pista sobre el soporte o el eje

Si existe una holgura excesiva, puede que la pista gire con movimiento relativo respecto al soporte o al eje. Suelen aparecer en los espectros en forma de múltiples armónicos de la velocidad de rotación del rodamiento con amplitudes muy bajas, por lo que fácilmente pasa desapercibido.

-Modelo correspondiente a lubricación inapropiada

La lubricación inadecuada produce un fallo en el rodamiento que puede asimilarse a un conjunto de grietas uniformemente distribuidas en las superficies de bolas y pistas, por lo que aparecerá la respuesta estructural del rodamiento como resultado de la excitación aleatoria.

-Modelo relacionado con la contaminación externa de partículas

La contaminación externa con partículas de diferentes materiales se da a menudo en ambientes agresivos de polvo y/o suciedad, como en minas, cementeras, etc.

No cabe esperar frecuencias dominantes significativas, sólo una elevación del valor pico de la aceleración, identificaría probablemente a este defecto.

La aparición de graduales decrecimientos de nivel en los valores de pico debidos a la auto-expulsión de las partículas contaminantes, es otra característica de este defecto.



-Evaluación de rodamientos que giran a baja velocidad

Muchos rodamientos giran a velocidades inferiores a 250 rpm, lo que puede dar lugar a problemas derivados de limitaciones de frecuencia en el analizador y en el transductor.

Además del problema del filtrado, la respuesta de un analizador a las bajas frecuencias también se ve afectada por el acondicionamiento de señal y por los componentes del circuito de entrada.

También existen problemas a bajas frecuencias relacionados con los transductores.  
[T2]



**PARTE II:**

**COMPARACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS**

**DE ANÁLISIS DE VIBRACIONES**







La idea principal de este capítulo es, a partir de las medidas de varios proyectos, comparar las distintas técnicas de análisis de vibraciones y los resultados obtenidos para los defectos en rodamientos.

Las tesis doctorales que vamos a comparar son:

- Tesis Carlos José Roda Vázquez (1995)
- Tesis Higinio Rubio Alonso (2003)
- Tesis José María Marín López (2009)
- Tesis Omar José Lara Castro (2007)
- Tesis María Jesús Gómez García (2014)

Como vemos, entre las primeras tesis y las últimas se abarcan casi 20 años, y lo que se persigue es hacer un estudio comparativo de las técnicas que se han ido usando en las distintas tesis, ver cómo se han ido evolucionando, las nuevas técnicas que se han introducido al cabo de los años, y los resultados que somos capaces de obtener con cada una de ellas.

Por tanto, vamos a introducir el trabajo realizado por cada uno, y vamos a estudiar los siguientes puntos:

1. Condiciones de medición y rodamientos utilizados
2. Técnicas de diagnóstico
3. Ensayos realizados
4. Conclusiones
5. Otras aportaciones
6. Futuros desarrollos



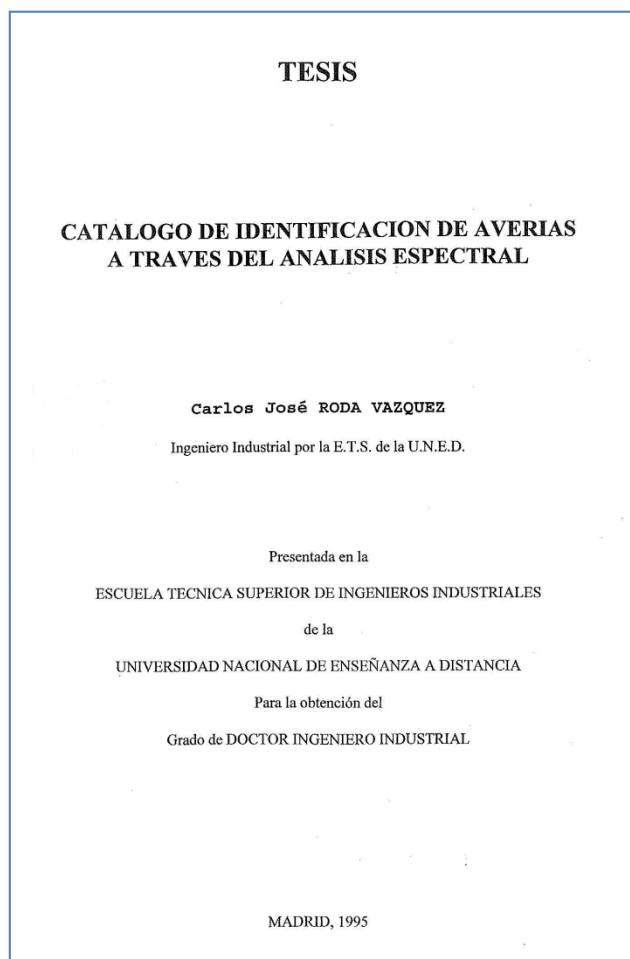


## **TEMA 6:**

**TESIS DOCTORAL DE CARLOS JOSÉ RODA  
VÁZQUEZ**



La primera tesis que nos ocupa pertenece a Carlos José Roda Vázquez. El título de la misma es: “Catálogo de identificación de averías a través del análisis espectral”. Está fechada en 1995.



En ella se aborda los defectos en un reductor ó caja de engranajes (compuesto por engranajes, rodamientos, ejes y carcasa), pero centrándose en los defectos en engranajes y rodamientos, que abarcan el 79% de los problemas que se da en este tipo de sistemas.

Nosotros extraeremos la parte concerniente a los rodamientos. Aunque existen diferentes tipos de rodamientos susceptibles de ser montados en las cajas de engranajes, este trabajo se centra en los rodamientos radiales de bolas y de rodillos, que son los más comúnmente montados en los reductores.

## 1. CONDICIONES DE MEDICIÓN Y RODAMIENTOS UTILIZADOS

Existen diferentes tipos de defectos en dichos rodamientos, sin embargo, los relacionados con la fatiga superficial y la rotura de pistas y jaulas abarcan el 80% de los mismos y por tanto este trabajo de centrará en ellos. Estos defectos son: defectos en pistas externas, en pistas internas, en elementos rodantes, en jaulas y defectos de montaje. Cada uno de estos defectos puede aparecer en varios grados o estados que definen el avance del deterioro del mismo y que abarcan desde el estado incipiente (estado 1), hasta el inminente fallo del rodamiento (estado 4).

Las pruebas realizadas serán las siguientes:

1. Rodamientos con defectos en pista exterior.
2. Rodamientos con defectos en pista interior.
3. Rodamientos con defectos en elementos rodantes.
4. Falta de engrase en rodamientos.

### BANCOS ENSAYOS

Los ensayos para la diagnosis de este grupo de defectos realizados sobre un **Reductor del banco de ensayos**, que constituye un modelo a escala de los reductores de 460Kw, montados en las cintas transportadoras de la mina de ENDESA en Puentes. Para llevar a cabo dichas pruebas, se va a usar la caja de engranajes vista en el capítulo 5:

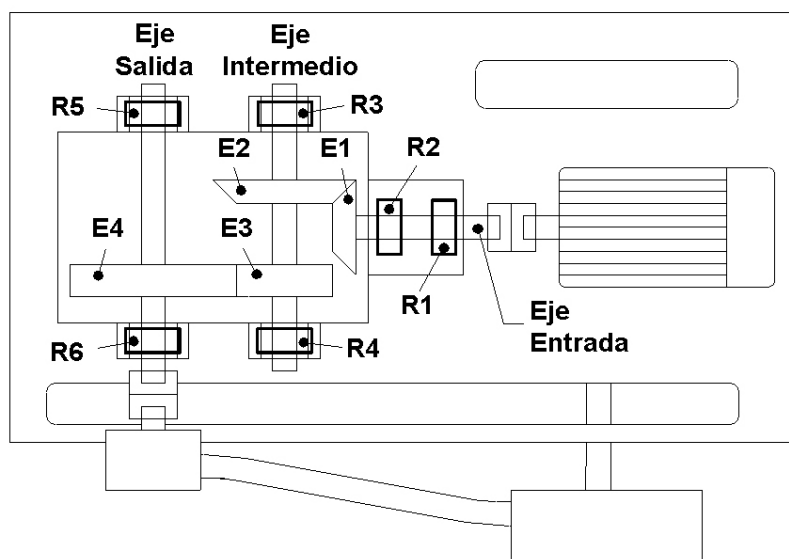


Figura 6.1.- Caja de engranajes.



Se provocarán los siguientes defectos sobre la caja de engranajes:

1. Rodamiento M1, SKF 3206A, con objeto extraño en su interior y pista mellada.
2. Rodamiento M2, SKF 22308 EK, con dos rodillos esmerilados.
3. Rodamiento M3, SKF 22208 CC, con pista exterior rota.
4. Rodamiento M4, SKF NU 208 EC, dos rodillos esmerilados.
5. Rodamiento M5, SKF 6208, con bola deteriorada.
6. Rodamiento M6, SKF NU 208 EC, con pista interior con ranura transversal.

Cada una de estas pruebas se realizará con dos velocidades diferentes de giro del eje de entrada del reductor (900 y 1500 rpm) y con dos cargas (200 y 400 kg/cm<sup>2</sup>)

#### OTROS DATOS DISPONIBLES

Además, se va a disponer para el estudio de la información existente en la base de datos del mantenimiento predictivo de 2 tipos de reductores reales de la mina Puentes-ENDESA, prototipos muy aproximados del reductor del banco de ensayos. Dichos equipos son:

1. **Reductores prototipo del correspondiente al banco de ensayos**, de 460 Kw,  $i = 12,3$ , funcionando en la mina de Puentes- ENDESA.

En los reductores prototipo de la mina de Puentes, los defectos reales que se han analizado fueron los siguientes:

- Desgastes en rodamientos.
- Desconchamientos en pistas
- Desconchamientos en bolas y rodillos.
- Roturas de pistas.

2. **Bomba SULZER** de  $Q = 6000 \text{ m}^3/\text{h}$ , para bombeo de agua de mina Puentes-ENDESA

En la bomba, se analizaron un par de defectos en rodamientos, para compararlos con defectos similares en cajas de engranajes.

3. **Tambores matrices de cinta transportadora**, de 1200mm de diámetro por 2400mm de largo.



## **2. TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO**

Para analizar los defectos desde la fase de diagnóstico, se usan las siguientes técnicas:

- Firma espectral en aceleración y velocidad.
- Zoom.
- Cepstrum.
- Demodulaciones.
- Espectros selectivos.

El programa elegido para el tratamiento de datos es MATLAB, por su gran potencia de tratamiento y análisis y sobre él se han realizado subprogramas (macros) para posibilitar la realización de las siguientes técnicas: Demodulaciones, Cepstrum, Promediado temporal y frecuencial de señales, espectros selectivos...

## **3. ENSAYOS REALIZADOS**

A continuación se expondrán los resultados obtenidos en los ensayos realizados, y las informaciones disponibles.

Los rodamientos, de forma similar a lo que ocurría en caso de los engranajes, al pasar los elementos rodantes (bolas o rodillos), por un defecto localizado en las pistas o en el mismo elemento rodante, provocan una deficiencia en el contacto de ambos elementos y consecuentemente un impacto que excita las frecuencias naturales de pistas, bolas, rodillos, soportes, ejes, etc.

Estas frecuencias naturales estarán moduladas por la frecuencia de impacto, la cual coincidirá con la frecuencia rotacional del defecto correspondiente.

Esta característica nos presenta una oportunidad inapreciable para la detección de daños en rodamientos, tarea difícil de realizar con éxito a través de la localización de las frecuencias rotacionales en los espectros, ya que debido a su baja amplitud y a los deslizamientos producidos en los rodillos, quedan tapadas por el ruido.



### 3.1. DEFECTOS SIMPLES

En la figura 6.2 se representa el espectro en aceleración del rodamiento de doble hilera de rodillos a rótula, correspondiente al eje de entrada, ( $n = 980$  r.p.m.), de un gran reductor de 630 Kw y reducción  $i = 196$ , que va instalado en el rodete de una máquina excavadora en la mina de ENDESA-As Pontes; como se ve, los valores globales de aceleración llegaban a 4,84 g.

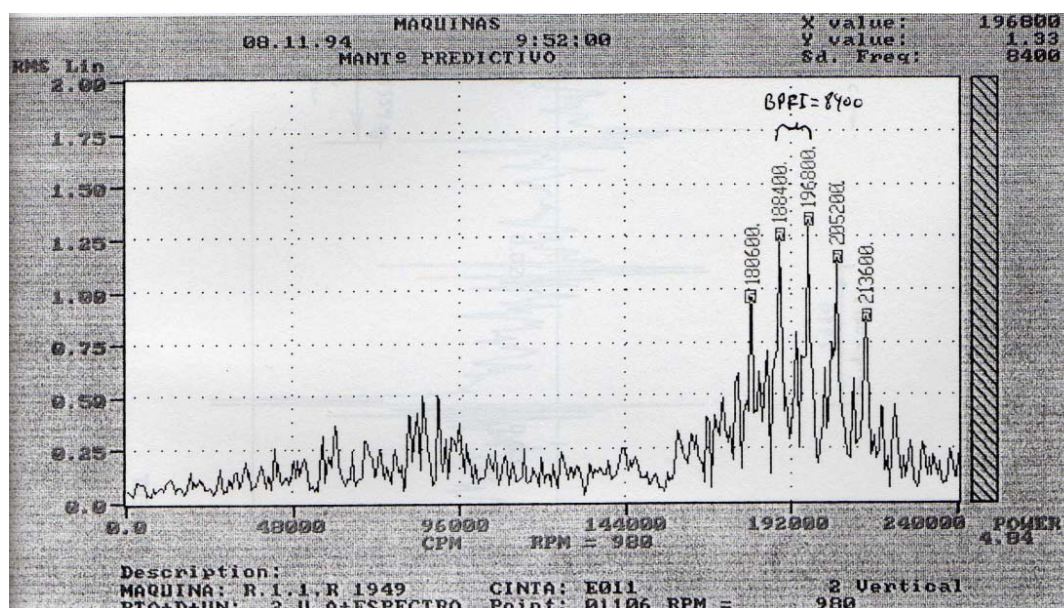


Figura 6.2.- Espectro en aceleración rodamiento de doble hilera.

Se pueden observar claramente en la banda de rodamientos (150000:220000cpm), bandas laterales espaciadas a 8400cpm, frecuencia que se corresponde con la BPFI (defecto en pista interior).

\* Frecuencia de repetición de los impactos:  $1/0,0071359 = 8400$  c.p.m.= BPFO.

\* Frecuencia de la vibración producida por cada impacto:

$1/0.0000054 = 184000$  c.p.m.= Frecuencia de resonancia del montaje del rodamiento.

\* Longitud del registro tornado  $0,057$  sg = 1 vuelta del eje.

Extraída la señal temporal correspondiente a dicho rodamiento (figura 6.3), se observaron claramente los impactos producidos por el paso de los rodillos sobre el defecto, de acuerdo con los parámetros calculados.

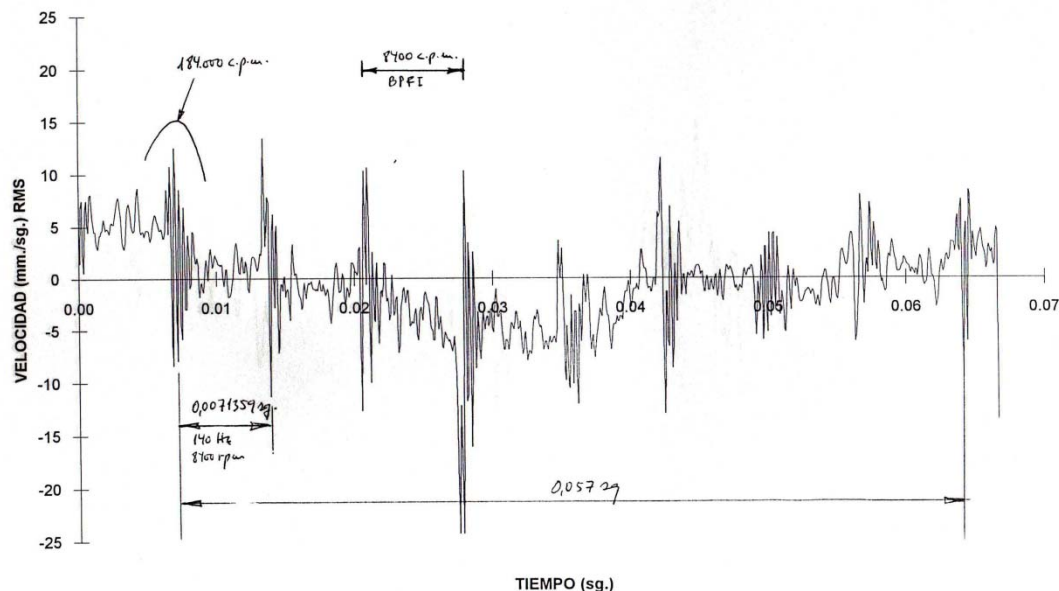


Figura 6.3.- Señal de velocidad.

Al desmontar el rodamiento, se observó una rotura transversal limpia de la pista interior, producida posiblemente por una deficiencia del montaje del rodamiento sobre el eje.

Como se puede ver, en este caso no fue necesario tratar la señal temporal para poder extraer conclusiones de la simple observación de la misma, debido a que se trataba de un defecto único y sencillo; sin embargo, normalmente esto no ocurre así y se hacen necesarios los tratamientos de las señales que vamos a ver, siempre que se necesite recurrir a la señal temporal.

## 3.2. ESPECTROS TEMPORALES DE REDUCTORES PROTOTIPO

### 1. ESPECTRO ACELERACIÓN PUNTO M1

La figura 6.4 es el espectro en aceleración, de 3200 líneas, correspondiente al punto M1 del eje de entrada de un reductor prototipo de mina.

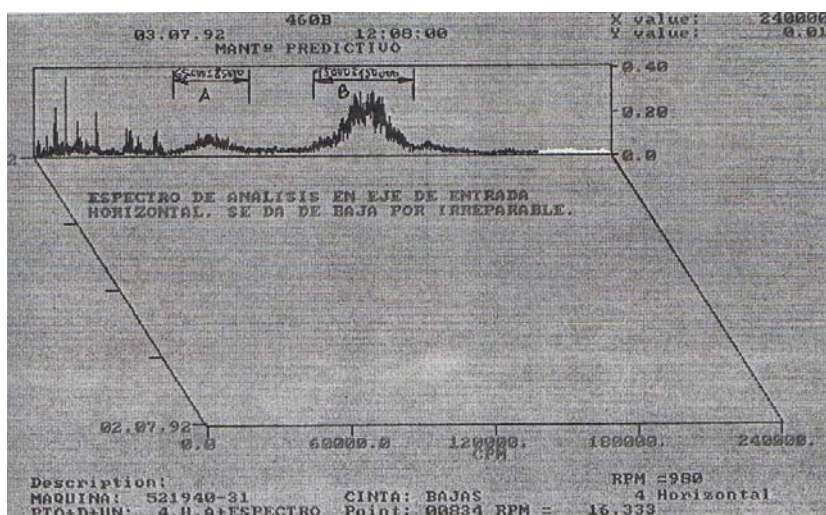


Figura 6.4.- Espectro en aceleración en punta M1-H en eje de entrada.

Se ven claramente dos elevaciones tipo “montaña”, que se corresponden con frecuencias naturales y sus modulaciones, de los "montajes" de rodamientos del eje de entrada, entendiendo por "montaje" el conjunto rodamiento, eje, soporte, etc.

- Zona A (60.000:85.000cpm): daños localizados en los rodamientos de rodillos.
- Zona B (95.000:130.000cpm): daños localizados en los rodamientos de bolas.

En la figura 6.5, se ha realizado un zoom de dicho espectro, donde se puede observar la presencia de una holgura excesiva en los ataques de los grupos cónico y cilíndrico.

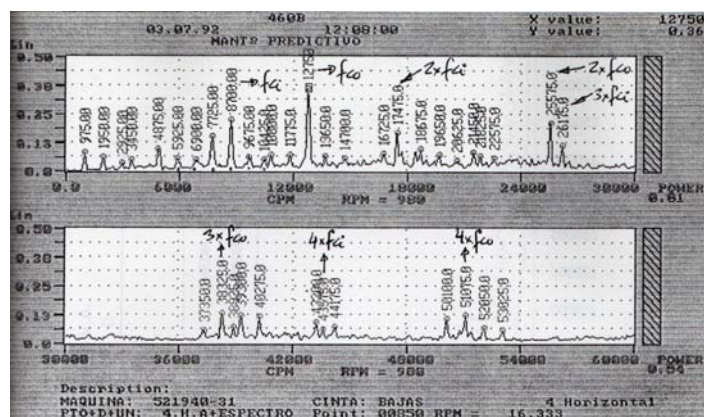


Figura 6.5.- Zoom de zona A.



En la figura 6.6, se observa un zoom de la zona B del espectro, correspondiente a los rodamientos de bolas, en donde se puede ver un ruido de fonda elevado y una gran profusión de pequeños picos, que parecen apuntar hacia una elevada modulación y/o aparición de frecuencias aleatorias, originadas por los elementos rodantes sobre las pistas.

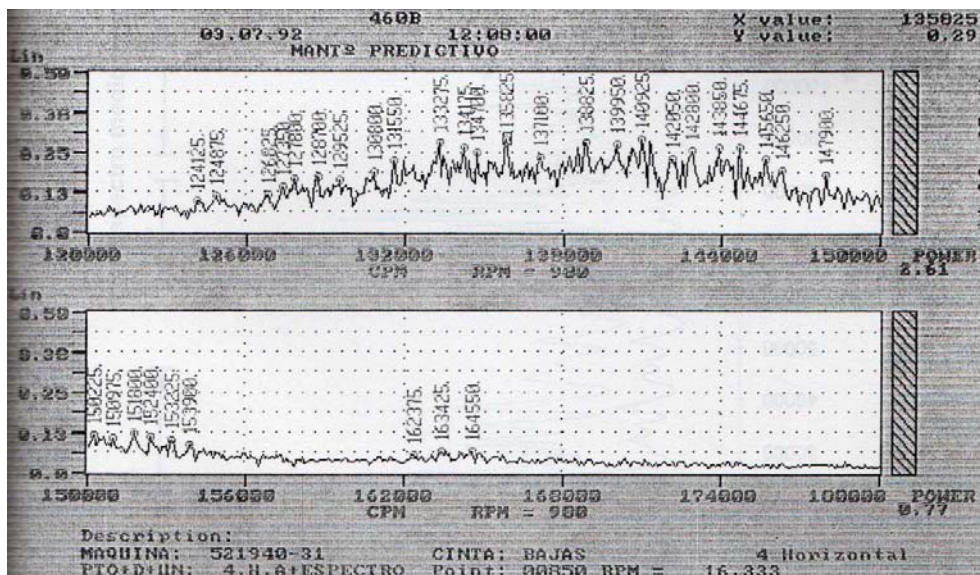


Figura 6.6.- Zoom zona B (rodamiento de bolas).

Estos aspectos que se acaban de comentar, constituyen una tendencia general, sobre todo para los rodamientos que hayan superado el estado 2, como se pone de manifiesto a en la figura 6.7, donde se puede ver el espectro medio y 1x (desviación típica), de todos los reductores prototipo de la mina (población de 3000 muestras).

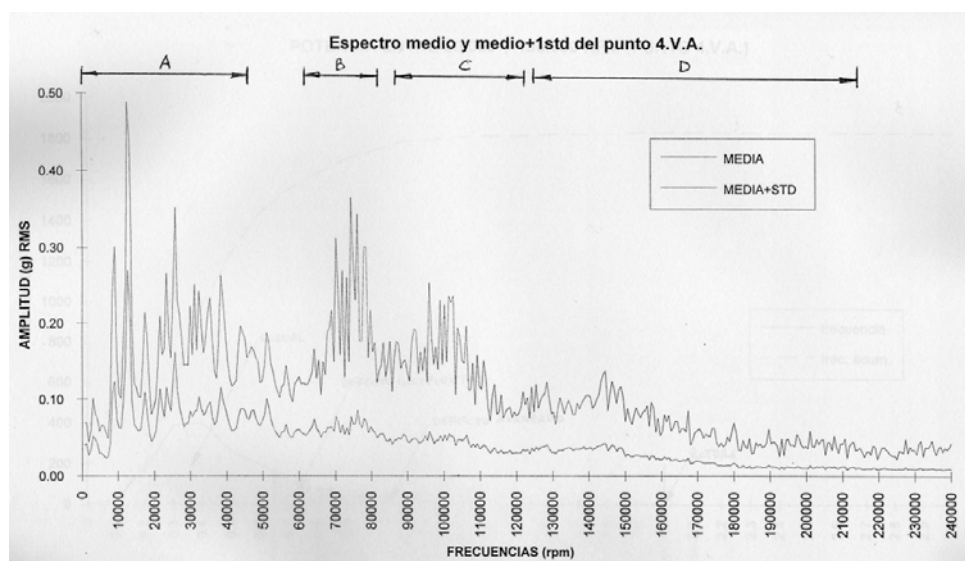


Figura 6.7.- Espectro medio de todos los reductores prototipo de la mina.

Se pueden observar claramente 4 zonas:

- Zona A: Corresponde a frecuencias de giro de ejes, de engrane de trenes y sus armónicos que definen básicamente defectos de montaje.
- Zona B: Corresponde a frecuencias de resonancia de los montajes de rodamientos de rodillos, en estado comprendido entre 2 y 3.
- Zona C: Corresponde a frecuencias de resonancia de los montajes de rodamientos de bolas, en estado comprendido entre 2 y 3.
- Zona D: Corresponde a frecuencias de resonancia de varios elementos que componen el reductor (carcasa, bancada, etc) y a veces es ocupada por una expansión de las zonas B y C originada por un exceso de modulación y armónicos típicos del estado 3 y 4.

Si nos centramos en la zona de frecuencias entre 60000 y 156000cpm, y que por tanto, los valores de aceleración han de ser originados exclusivamente por defectos en los rodamientos, obtenemos la curva de frecuencia acumulada y densidad de frecuencia de aparición de los valores correspondientes a la potencia global, en valores de g-RMSN que tenemos en la figura 6.8.

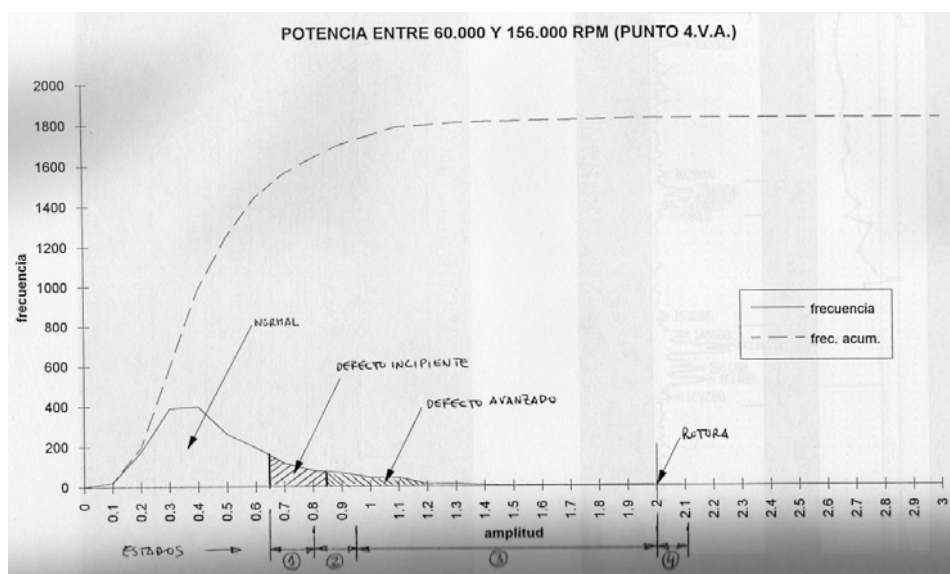


Figura 6.8.- Potencia espectral acumulada.

Los valores están cogidos en los reductores prototipo de la mina, punto M1.V(4V), observándose qué valores comprendidos entre 0,65 y 0,82 g-RMS corresponden al estado 1, comprendidos entre 0,82 y 0,95 al estado 2, entre 0,95 y 2 al estado 3, y mayores de 2 al estado 4.



## 2. ESPECTRO CON RODAMIENTOS EN ESTADO 3

En el figura 6.9, se presenta otro espectro similar a la figura 6.4, con rodamientos en estado "finales del 3", tanto los de rodillos (zona A) como los de bolas (zona B).

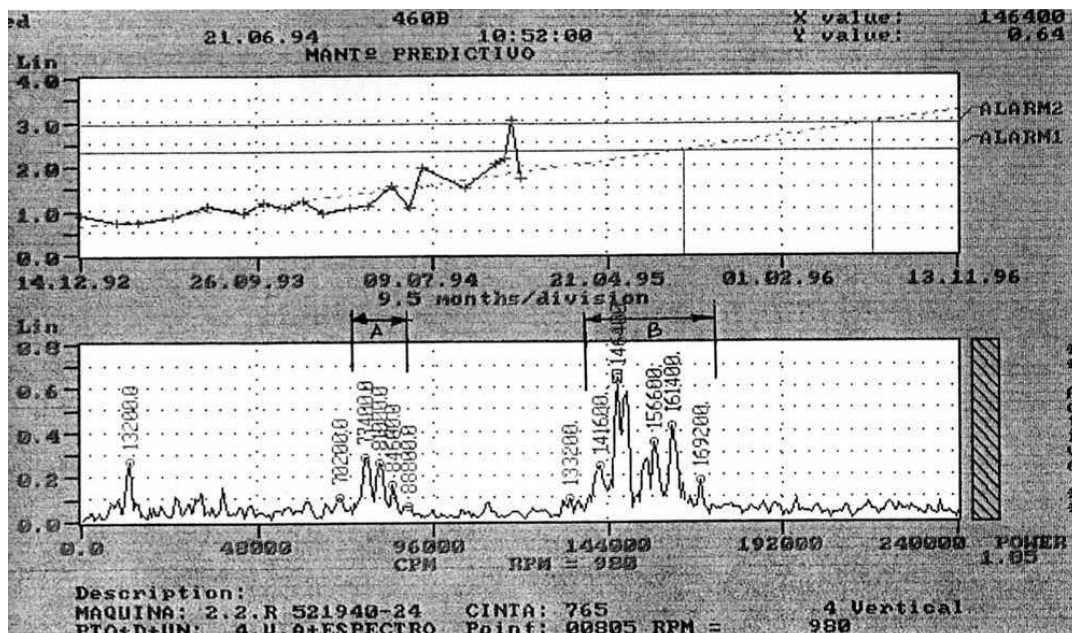


Figura 6.9.- Espectro con rodamientos estado 3.

Asimismo, se presenta la grafica de tendencia y la cascada temporal de espectros, en la que se observa su evolución temporal.

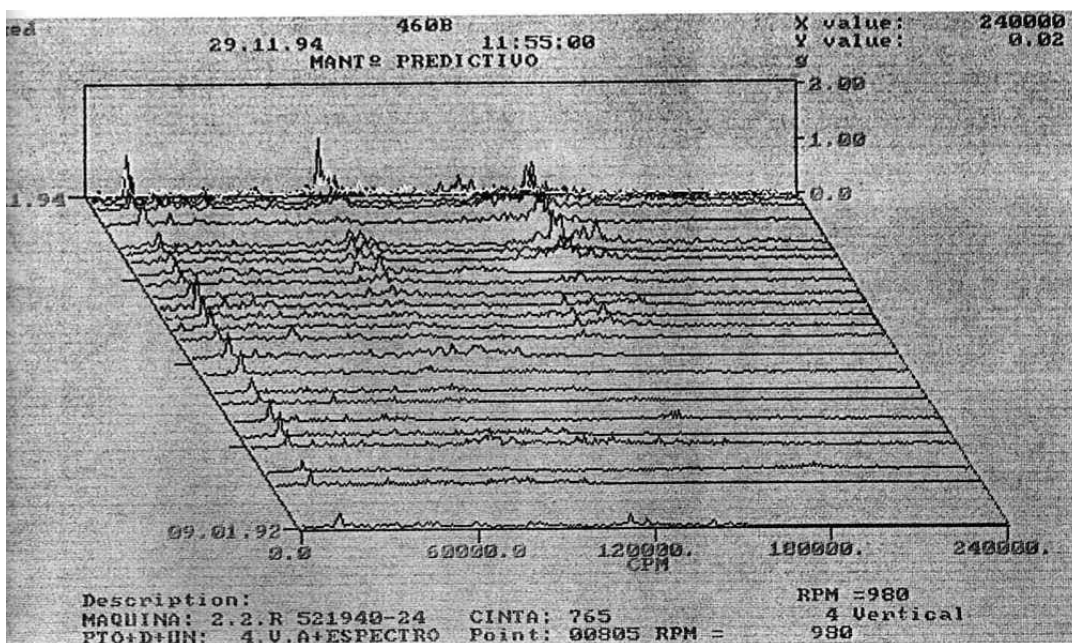


Figura 6.10.- Gráfica de tendencia y cascada temporal de espectros.



### 3. ESPECTRO CON OTROS RODAMIENTOS

Las siguientes figuras representan el espectro, tendencia y cascada temporal de un reductor similar a los anteriores, aunque con otro tipo de rodamientos.

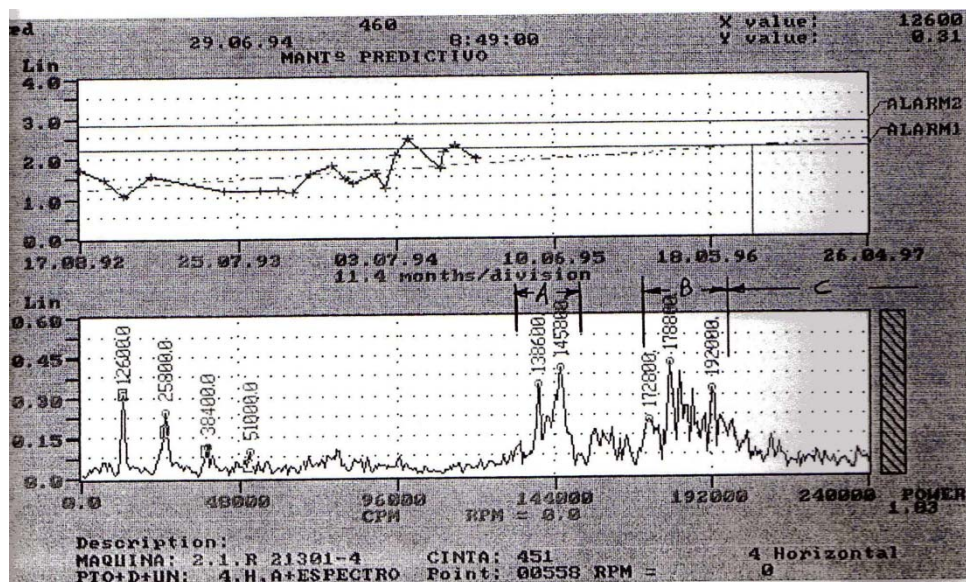


Figura 6.11.- Espectro temporal.

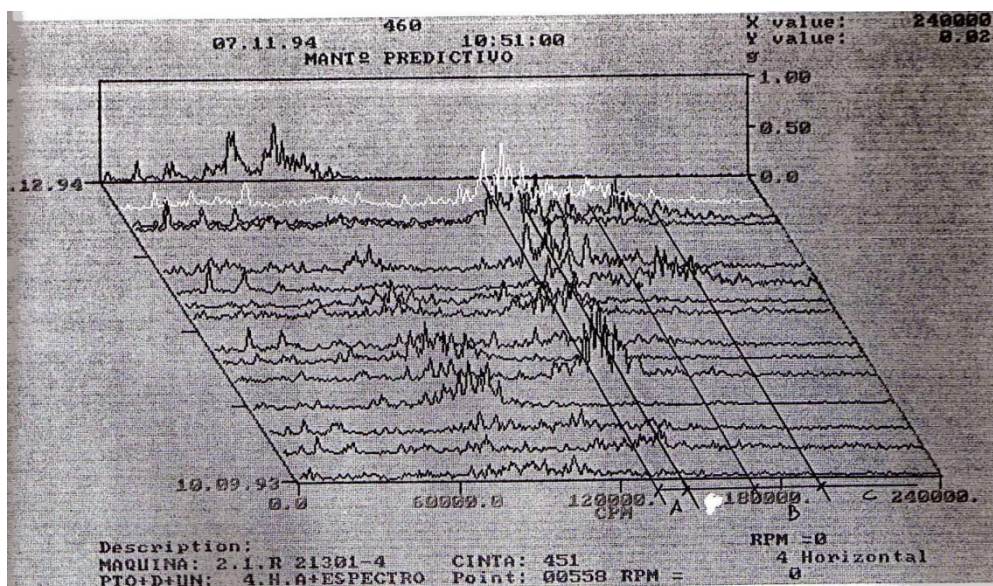


Figura 6.12.- Gráfica de tendencia y cascada temporal de espectros.

Se pueden observar las dos zonas de resonancias de eje de rodamientos del eje de entrada, más avanzadas en el eje de frecuencias que las anteriores (zonas A y B), y como comienza a elevarse ya la zona C.



#### 4. ESPECTRO CON RODAMIENTO DE RODILLOS EN ESTADO 3

En las siguientes figuras se representa espectro, tendencia y cascada de un reductor de mina similar a los anteriores.

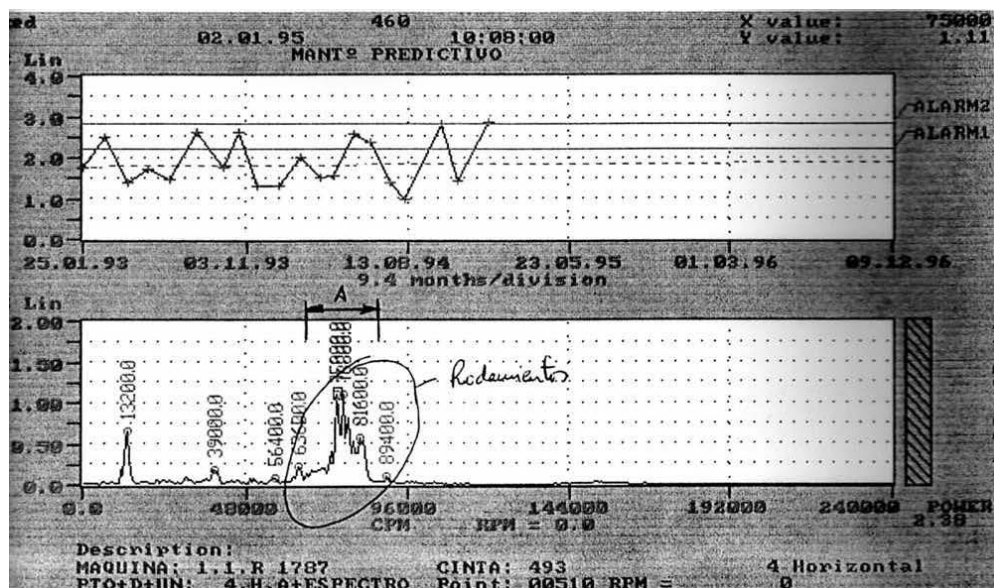


Figura 6.13.- Espectro temporal.

Se puede observar la elevación de la zona A, originada por un defecto en el/los rodamientos de rodillos del eje de entrada punto -M1.V, (4V), en el estado 3, consistente en un montaje inadecuado del mismo, (excesivo apriete).

Obsérvese en la cascada y en la tendencia las fluctuaciones de amplitud provocadas por variaciones en la carga.

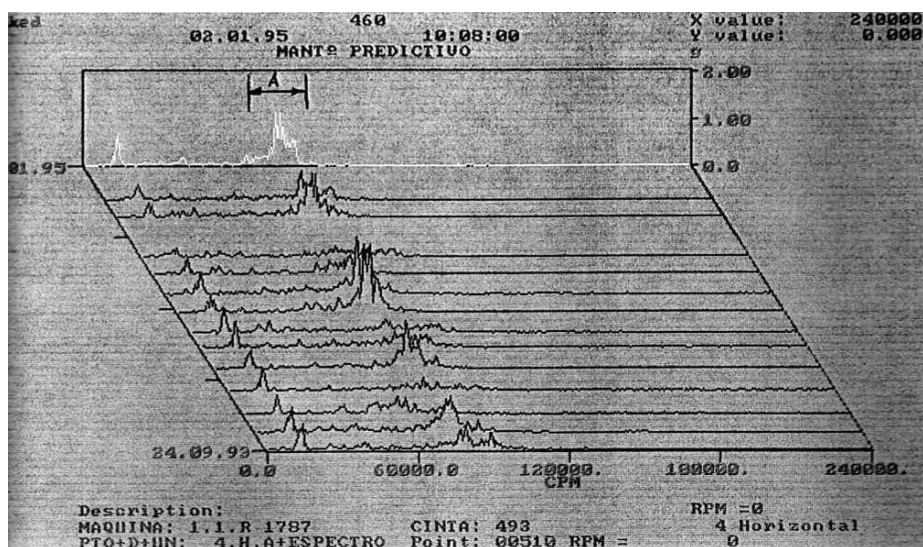


Figura 6.14.- Gráfica de tendencia y cascada temporal de espectros.



## 5. ESPECTRO CON DETERIORO PREMATURO DEL RODAMIENTO

Las siguientes figuras muestran el espectro, tendencia y cascada de un reductor de mina, con holguras en el ataque del grupo cónico (zona A), que provoca el deterioro prematuro de algún rodamiento del eje de entrada (zona B), que ya se encuentra en estado 3.

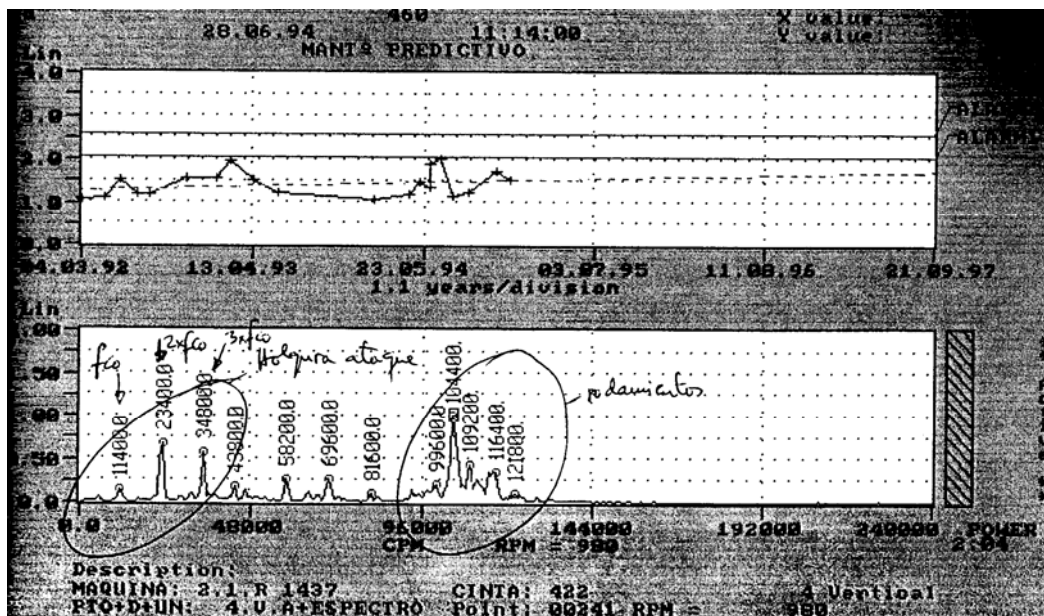


Figura 6.15.- Espectro temporal.

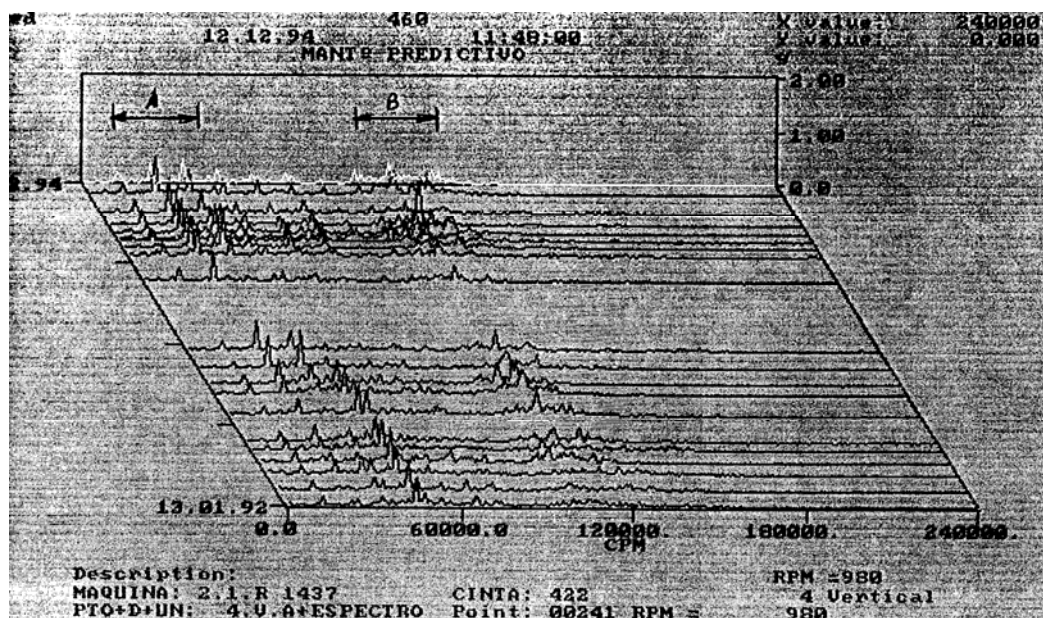


Figura 6.16.- Gráfica de tendencia y cascada temporal de espectros.



En la figura 6.17, se observa que del conjunto de la potencia medida en g-RMS del espectro (2,04 g -RMS), un 82,8% (1,69 g-RMS), pertenece a la zona de rodamientos (zona B).

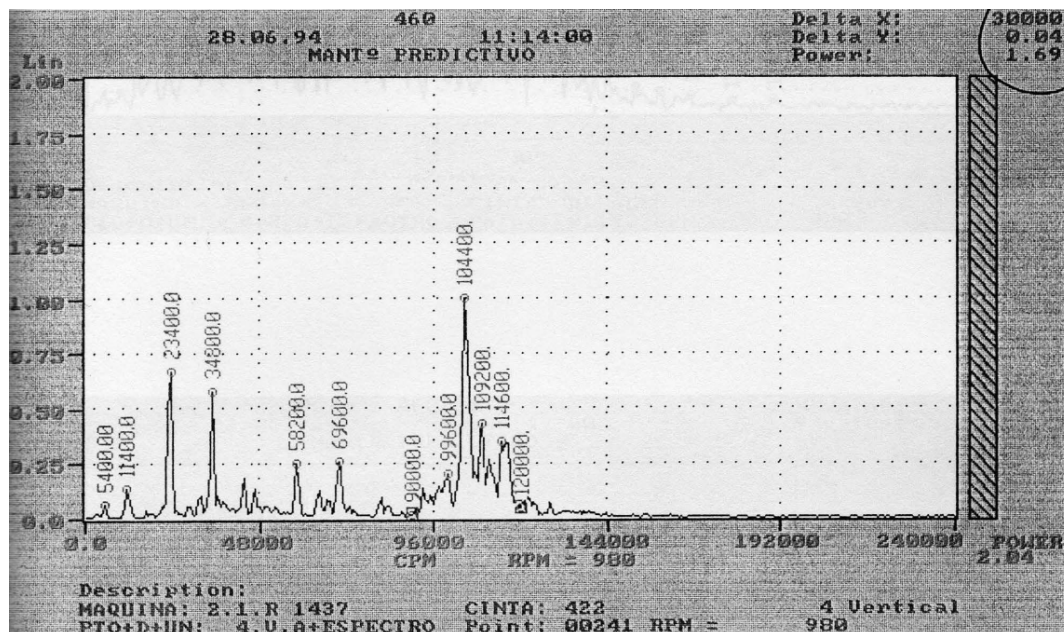


Figura 6.17.- Potencia del espectro.

## 6. ESPECTRO CON PROBLEMAS ENGRANAJES Y HOLGURAS

-En la figura 6.18, se presenta un espectro con problemas en engranajes y holguras en rodamientos, apareciendo una vez más el ruido excesivo y la multitud de picos.

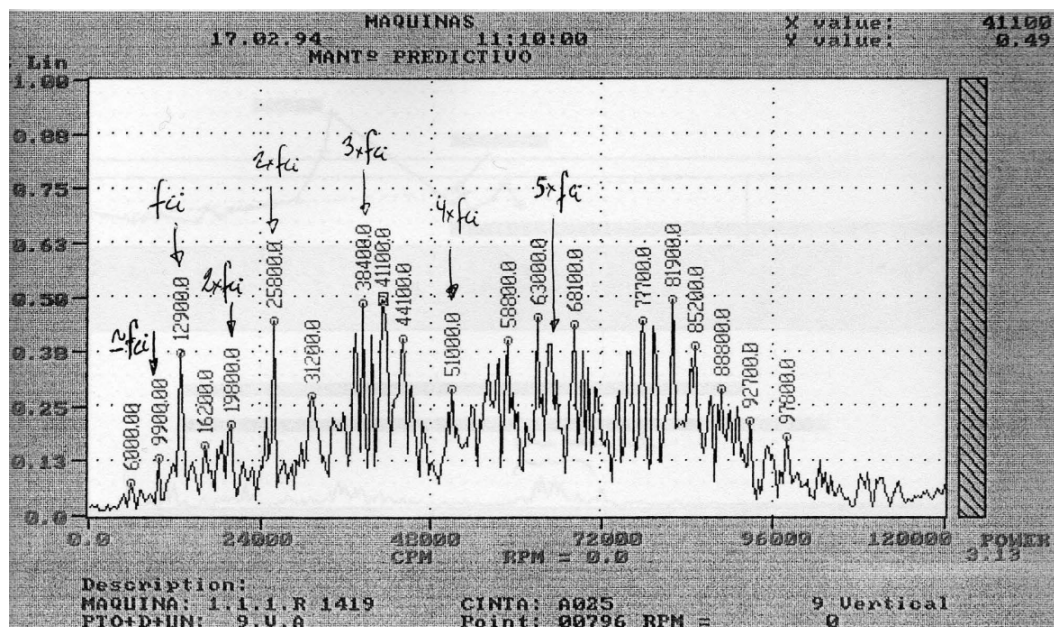


Figura 6.18.- Espectro temporal.

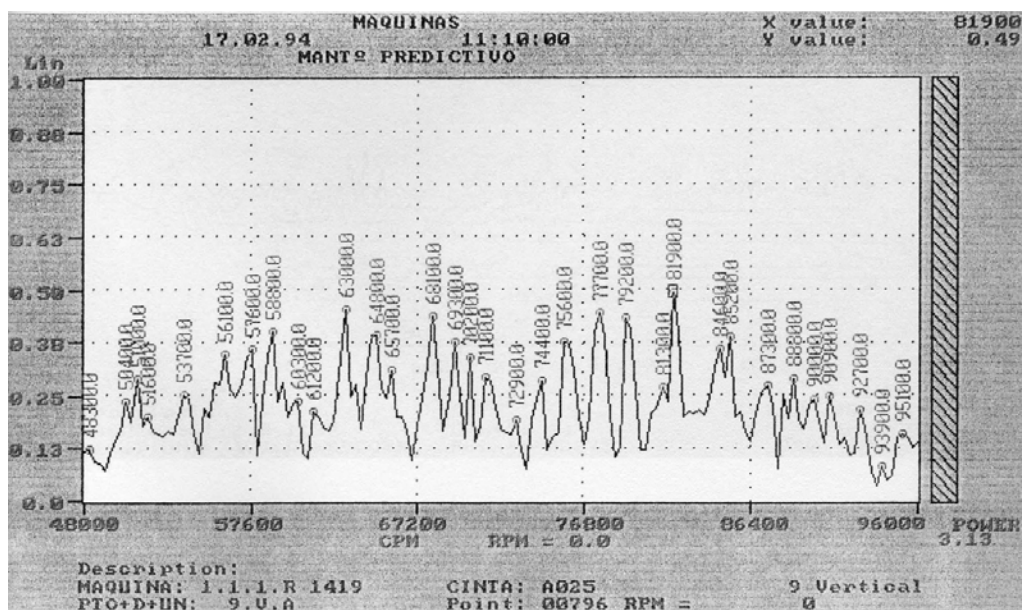


Figura 6.19.- Zoom del espectro temporal.

## 7. ESPECTRO CON EXCESO DE RUIDO

Las figuras presentan el espectro, tendencia y cascada de un reductor similar a los anteriores pero con rodamientos diferentes y con defectos de holgura excesiva (provocada por desgaste excesivo del soporte del rodamiento o de las pistas del rodamiento) en el ataque del tren cónico y en rodamientos.

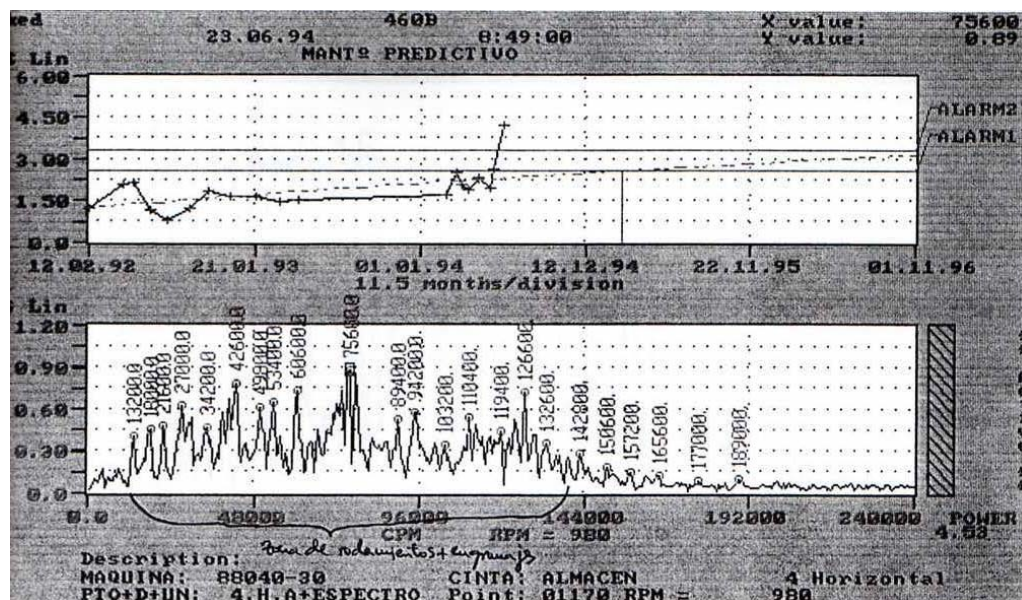


Figura 6.20.- Espectro temporal con holgura excesiva.

Obsérvese el elevado nivel de ruido de fondo y la gran profusión de picos; sería imposible localizar aquí las frecuencias rotacionales de defecto del rodamiento, incluso haciendo zoom, pues estarían "sumergidas" en el ruido.



Habrá que fijarse en la elevación de la banda de frecuencias de resonancia del montaje del o de los rodamientos, que en este caso se amplía al unirse esta con la correspondiente a la banda de defectos en engranajes, mezclándose asimismo las bandas laterales y complicando en definitiva el espectro.

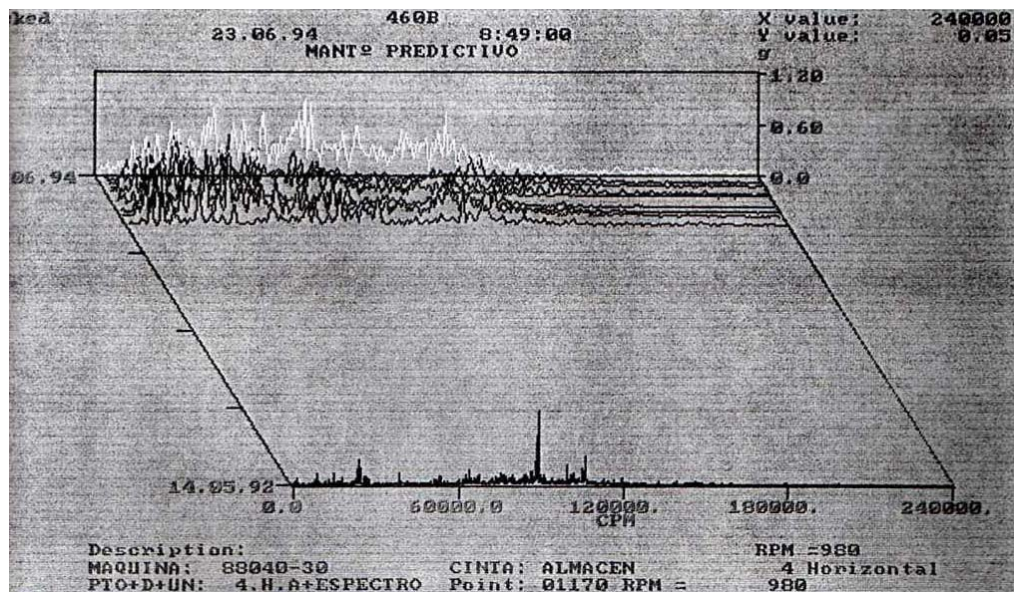


Figura 6.21.- Tendencia y cascada con holgura excesiva.

Es importante, como se ve, conocer la situación de las bandas de resonancia de los montajes de rodamientos dentro del espectro, para seguir su evolución y poder detectar a través de ellas los defectos en rodamientos, pues es la técnica más segura, rápida y fiable en estos casos.

### 3.3. BANCO DE ENSAYOS

La figura 6.22 corresponde al espectro en velocidad del reductor del banco de ensayos, punto M6, con el rodamiento deteriorado en su pista interior.

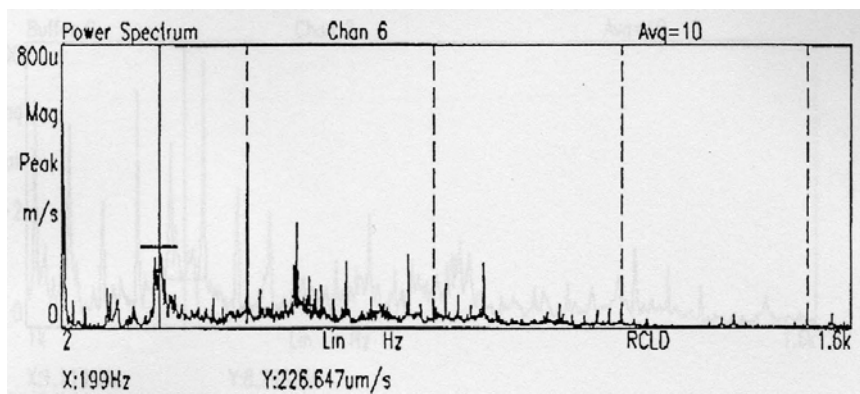


Figura 6.22.- Espectro en velocidad reductor banco de ensayos, M6 deteriorado.

Las siguientes figuras se corresponden a cepstrum del espectro anterior, donde se aprecia el pico correspondiente a la frecuencia rotacional de defecto de pista interior (BFI).

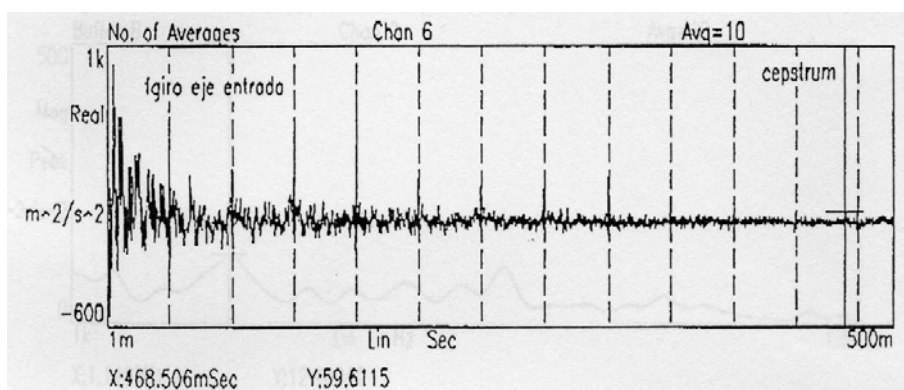


Figura 6.23.- Cepstrum del espectro anterior.

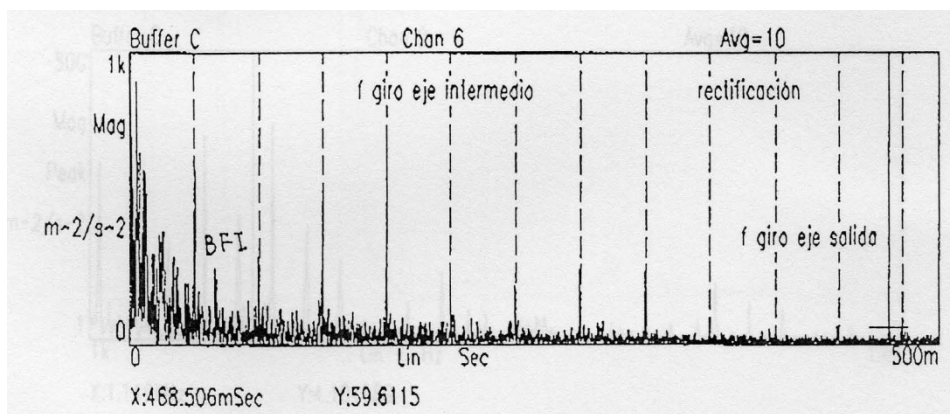


Figura 6.24.- Cepstrum rectificado del espectro anterior.

### 3.4. TÉCNICAS TEMPSEL

Las siguientes figuras muestran la técnica TEMPSEL, que es útil para localizar con gran exactitud las frecuencias de resonancia de rodamientos antes de proceder a la demodulación de sus bandas.

En la figura 6.25 se representa un espectro del reductor del banco de ensayos.

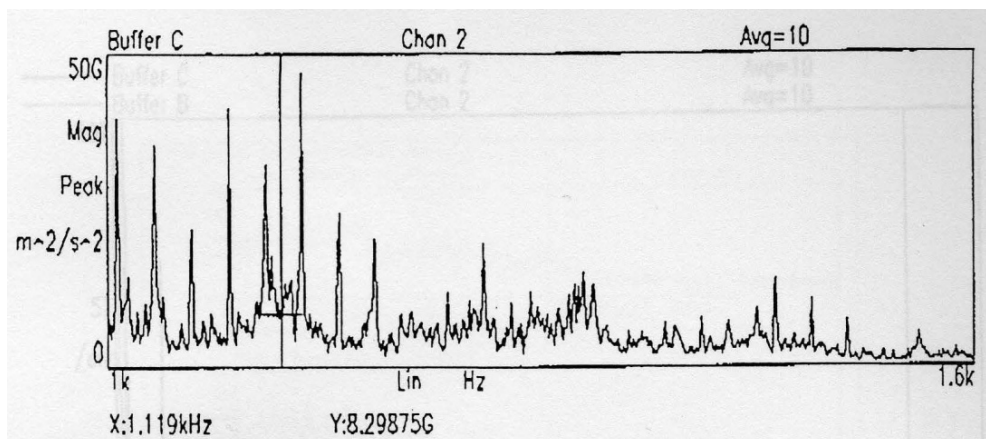


Figura 6.25.- Espectro reductor banco de ensayos.

En la figura 6.26 se representa el mismo espectro anterior pero una vez filtradas, vía Cepstrum, las periodicidades correspondientes a las frecuencias bajas de engranajes (giro de ejes y frecuencias de engrane), quedando solamente las señales no periódicas o asíncronas, formadas solamente por frecuencias de resonancia.

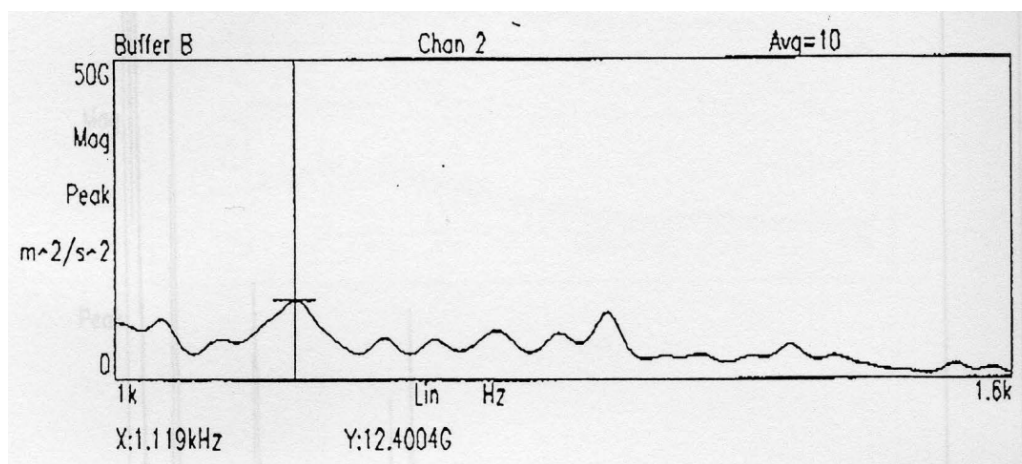


Figura 6.26.- Espectro filtrado Cepstrum.



La figura 6.27 representa el espectro correspondiente a las frecuencias síncronas con las velocidades de giro de ejes.

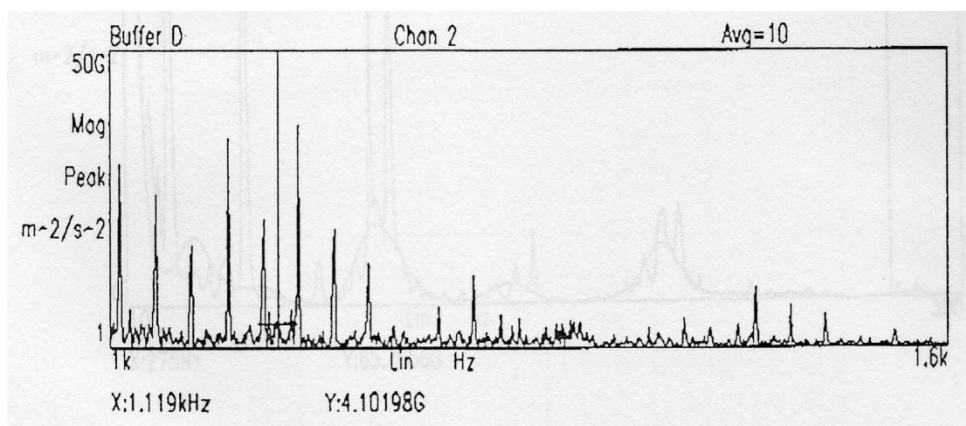


Figura 6.27.- Espectro de frecuencias síncronas.

La figura 6.28 representa el espectro de resonancias superpuesto sobre el espectro original, indicando las zonas de posibles resonancias de rodamientos que se estudiarán a continuación, a través de la técnica de demodulación.

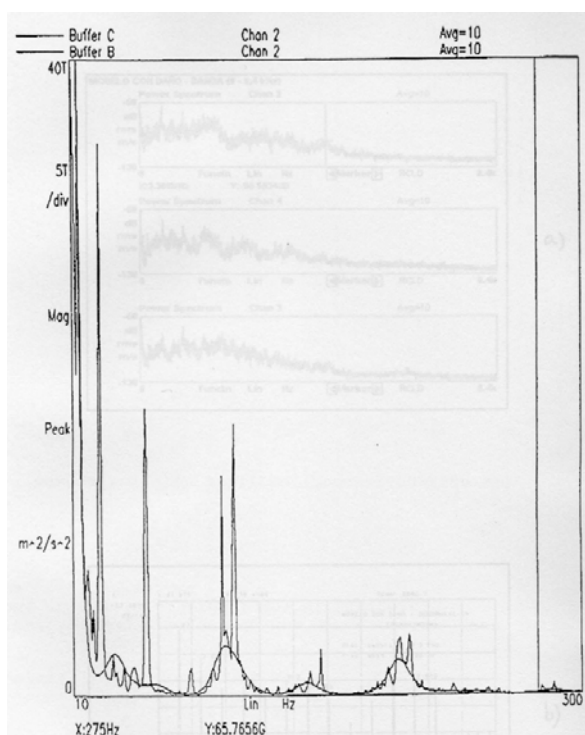


Figura 6.28.- Espectro de resonancias sobre espectro original.

La figura 6.29 presenta el espectro de los puntos M3 (canal 2) y M5 (canal 3), correspondientes al reductor del banco de ensayos, con daños en todos los rodamientos y en dos ruedas de engranajes.

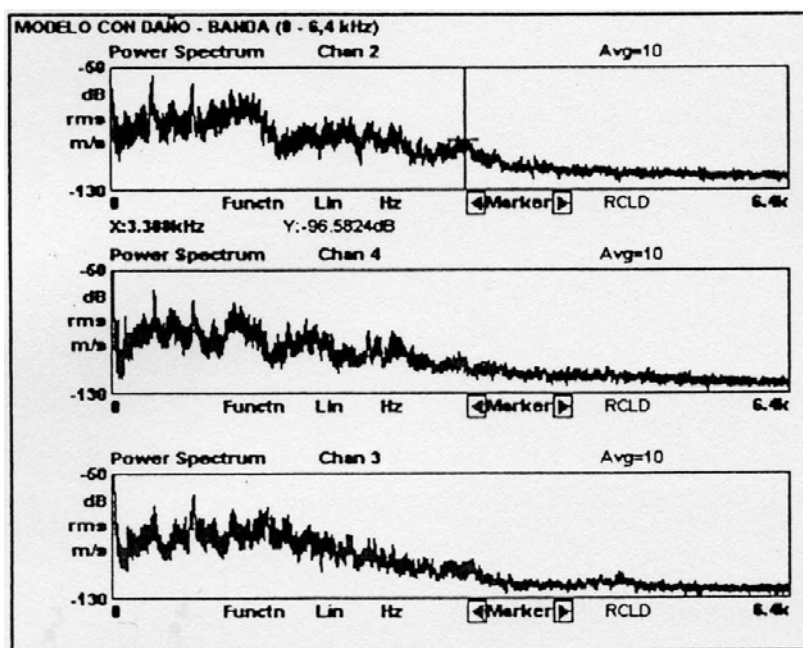


Figura 6.29.- Espectro en puntos del reductor.

Ha sido localizada, por el método anteriormente expuesto, una frecuencia de resonancia del rodamiento M3 a 3,3 KHz; si se realiza una demodulación alrededor de dicha frecuencia y con un ancho de banda de 200 Hz, obtenemos la figura 6.30.

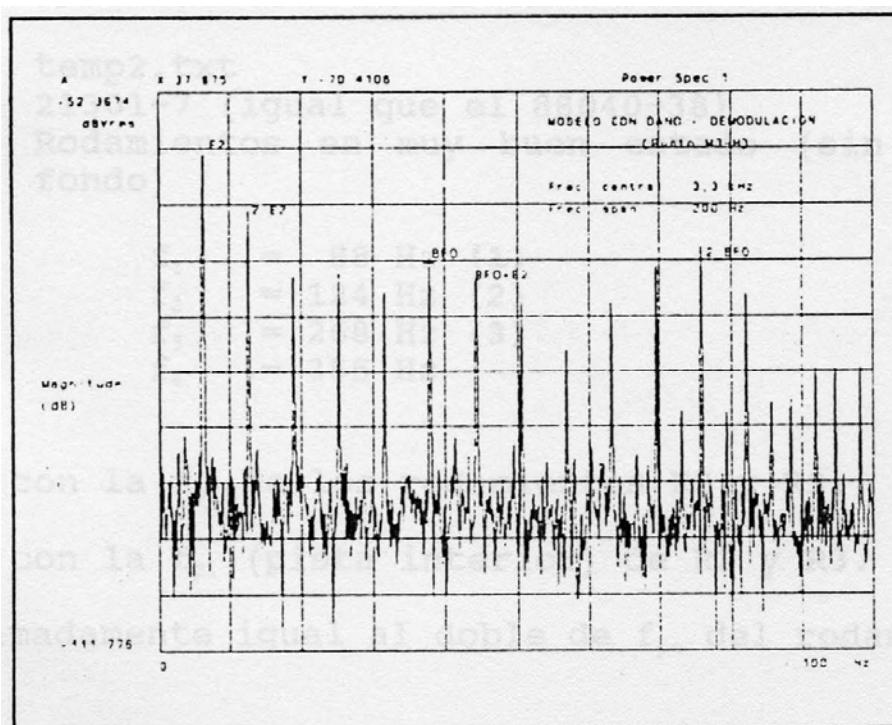


Figura 6.30.- Demodulación obtener frecuencia rodamiento M3.

Se puede apreciar en dicha figura la frecuencia rotacional de defecto en pista externa (BFO), que corresponde al rodamiento M3, con la pista exterior rota.



### 3.5. DEMODULACIONES

En las siguientes figuras se puede ver la señal temporal, el espectro y la demodulación de la banda de resonancia de los rodamientos del punto 4 de un reductor de mina.

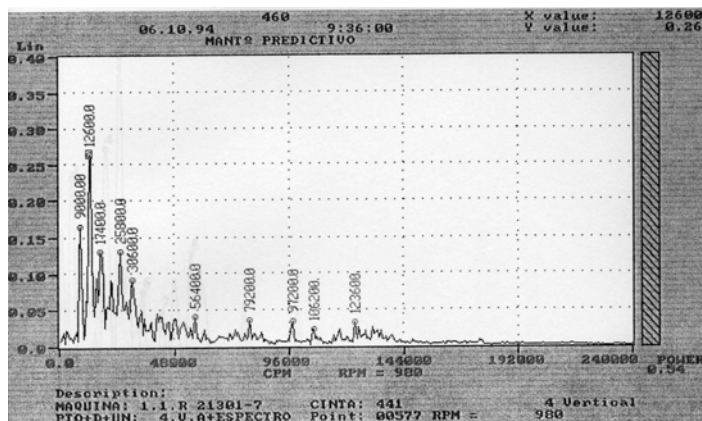


Figura 6.31.- Señal temporal punto 4.

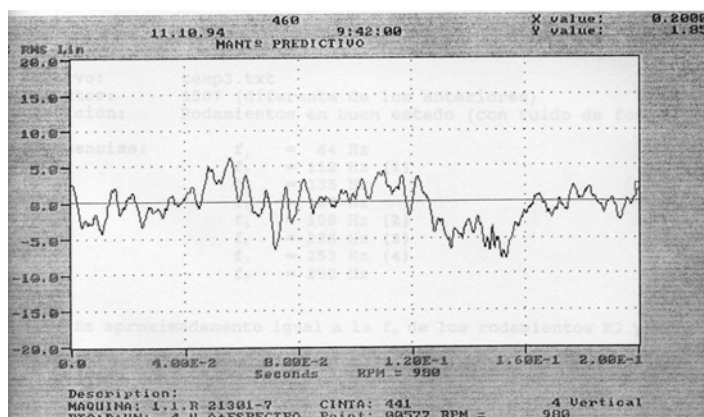


Figura 6.32.- Espectro temporal punto 4.

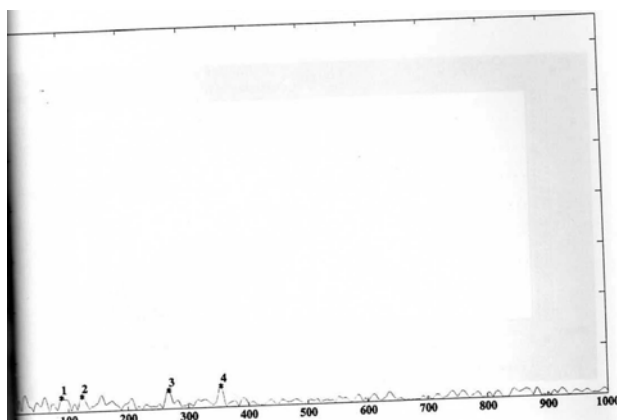


Figura 6.33.- Demodulación banda de resonancia.

La demodulación confirma que el rodamiento se encontraba en perfectas condiciones, con amplitudes muy bajas de las frecuencias rotacionales de defecto en pistas.

Podemos comparar las señales anteriores con las de otro rodamiento de reductor de mina, similar al anterior, aunque con rodamientos ligeramente diferentes.

Este reductor presenta un espectro con un mayor nivel de ruido de fondo, apreciable incluso en la señal temporal, causado posiblemente por algún defecto de montaje de engranajes y por un mayor deterioro de los rodamientos que en el caso anterior.

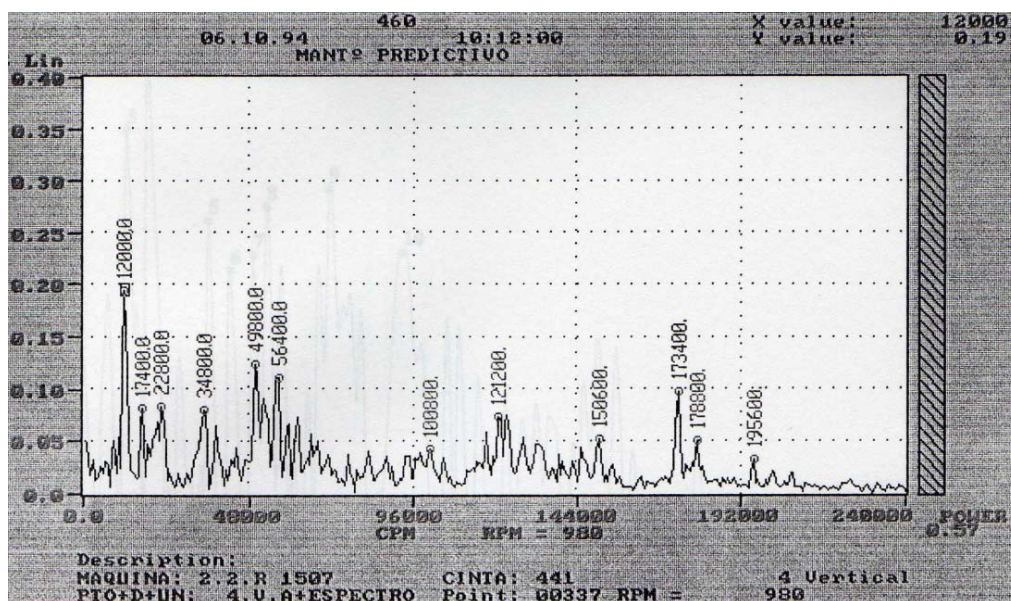


Figura 6.34.- Señal temporal.

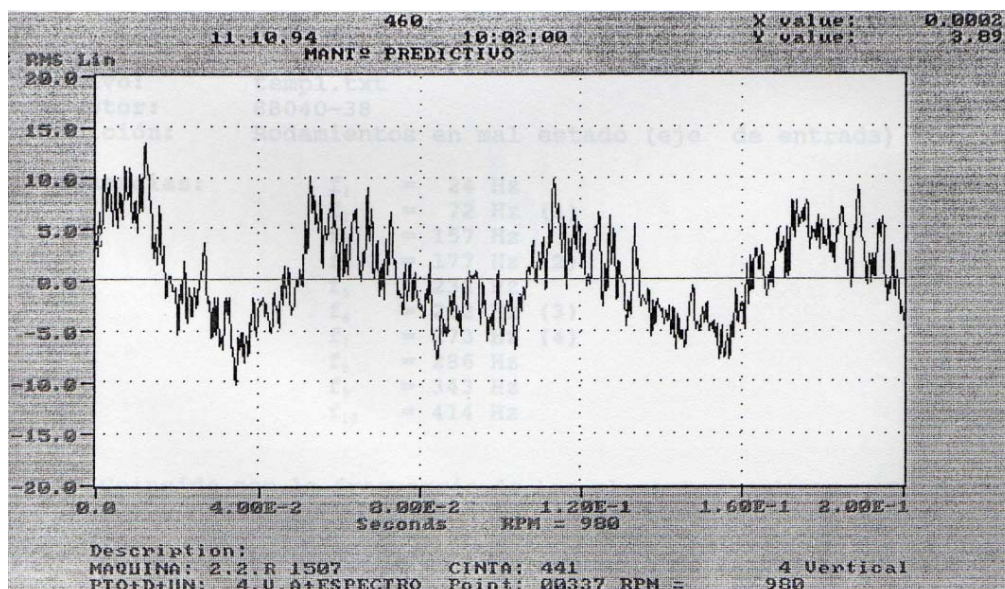


Figura 6.35.- Espectro señal.



En la figura 6.36 se representa la demodulación de la banda de resonancia.

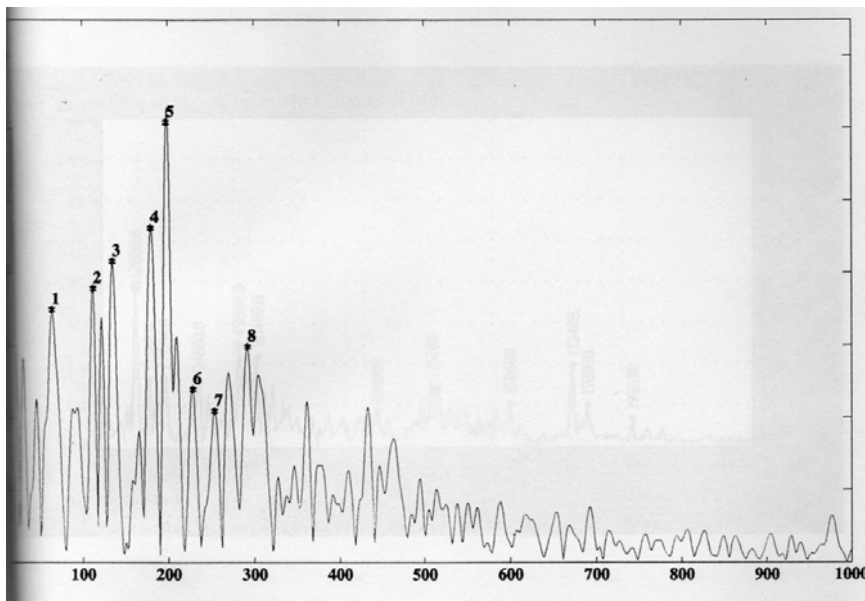


Figura 6.36.- Demodulación banda de resonancia.

Las premisas que se hicieron se confirman observando: el pico correspondiente a la frecuencia de engrane del grupo cónico (confirmando los problemas de montaje), y los picos coincidentes con las frecuencias rotacionales de defecto en pista externa y de bolas.

Por último, también podemos observar el espectro y la señal temporal del punto M1 de otro reductor que se representa en el anexo 6.37, se encontraban algunos de los rodamientos en estado 3.

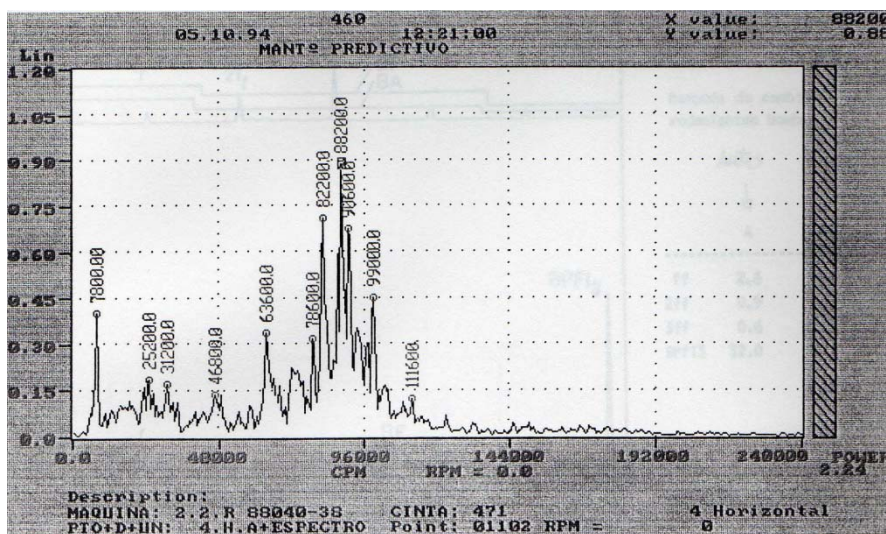


Figura 6.37.- Señal temporal.

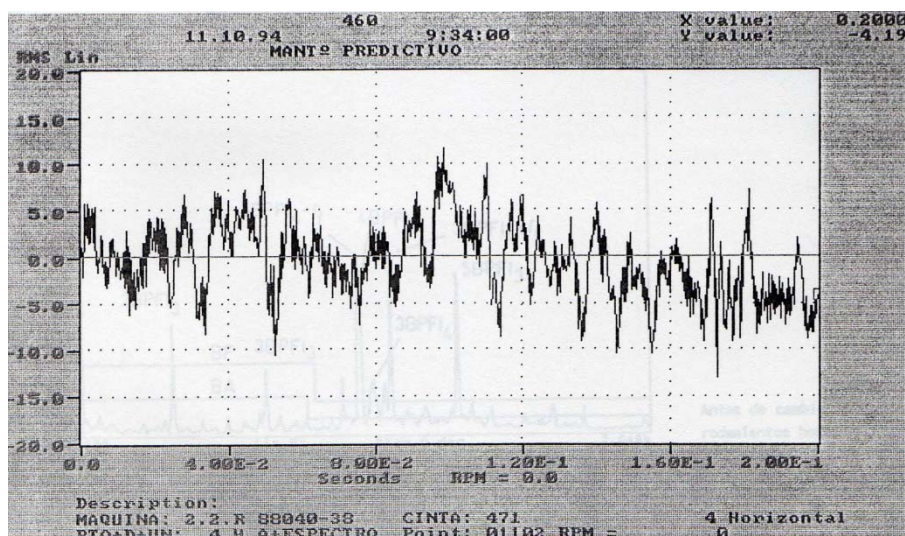


Figura 6.38.- Espectro señal.

La figura 6.39 corresponde a la demodulación en la banda de los rodamientos.

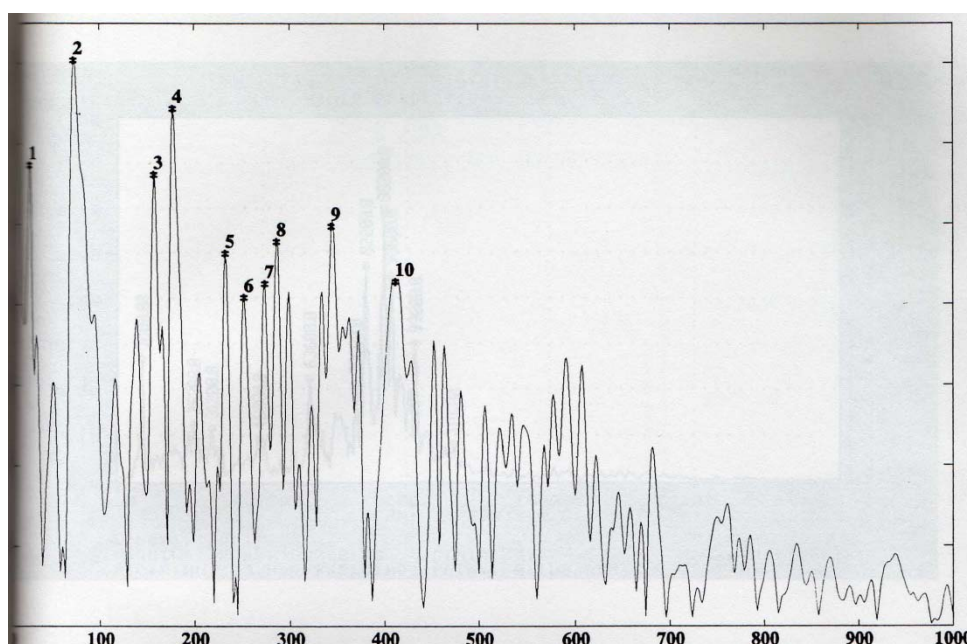


Figura 6.39.- Demodulación banda rodamientos M1.

Se confirman la presencia de los defectos, por las elevadas amplitudes de las frecuencias correspondientes a defectos en pistas y elementos rodantes de los rodamientos.



### 3.6. ESPECTRO ANTES Y DESPUES DEL CAMBIO DE RODAMIENTO

Las siguientes figuras representan los espectros en aceleración de un reductor de mina, punto M1, antes de cambiar rodamientos (figura 6.40) y después de cambiar rodamientos (figura 6.41).

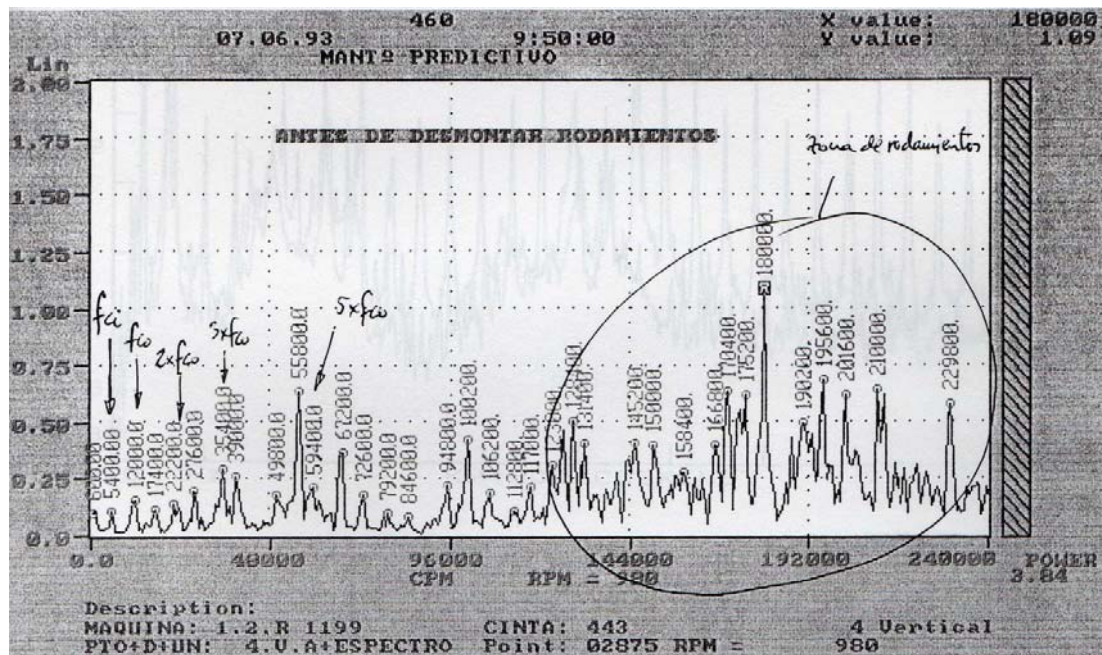


Figura 6.40.- Espectro antes del cambio de rodamientos.

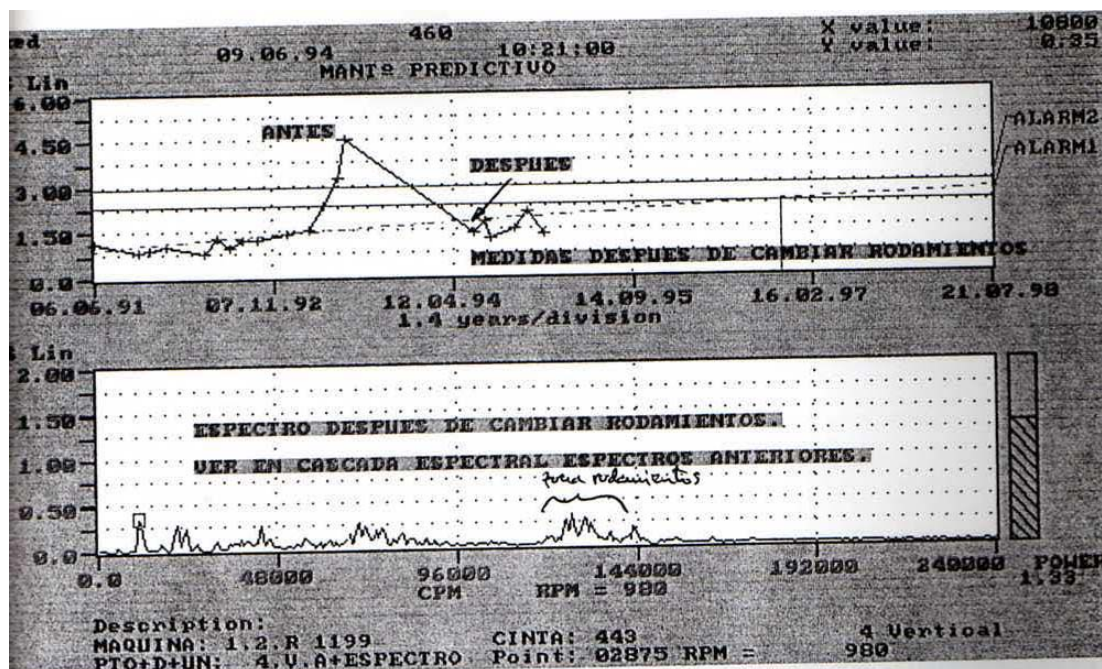


Figura 6.41.- Espectro temporal después de cambiar.

Obsérvese la diferencia de amplitudes en la banda de rodamientos (120.000:240.000 cpm) y en el valor global de aceleración, dado por el gráfico de tendencias.

En la figura 6.42 se representa la cascada de espectros en donde se puede observar la evolución temporal de los mismos.

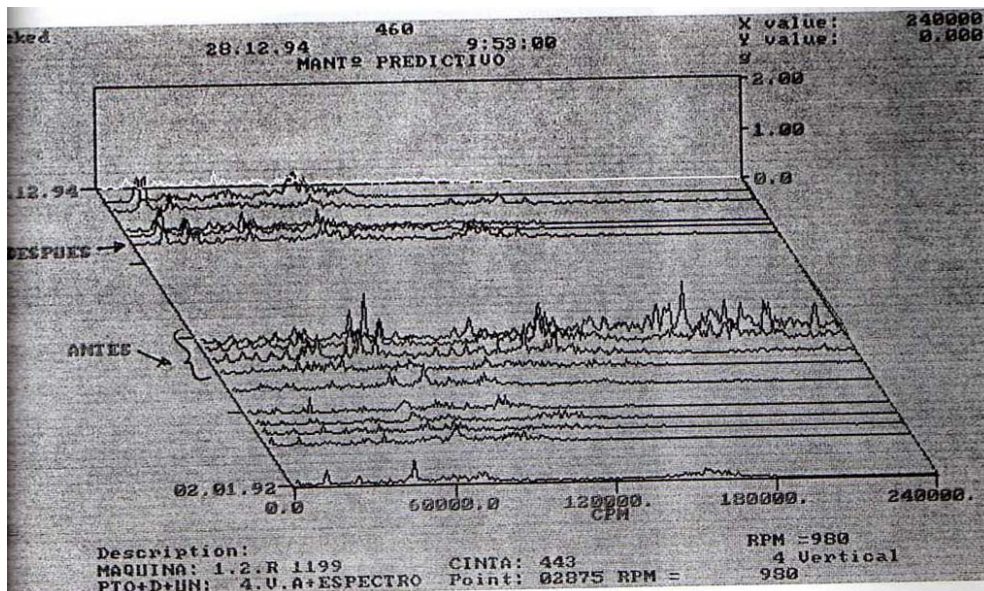


Figura 6.42.- Cascada de espectros.

En la figura 6.43 se puede ver un espectro en aceleración, característico del rodamiento de una bomba con holgura, antes y después del cambio del mismo.

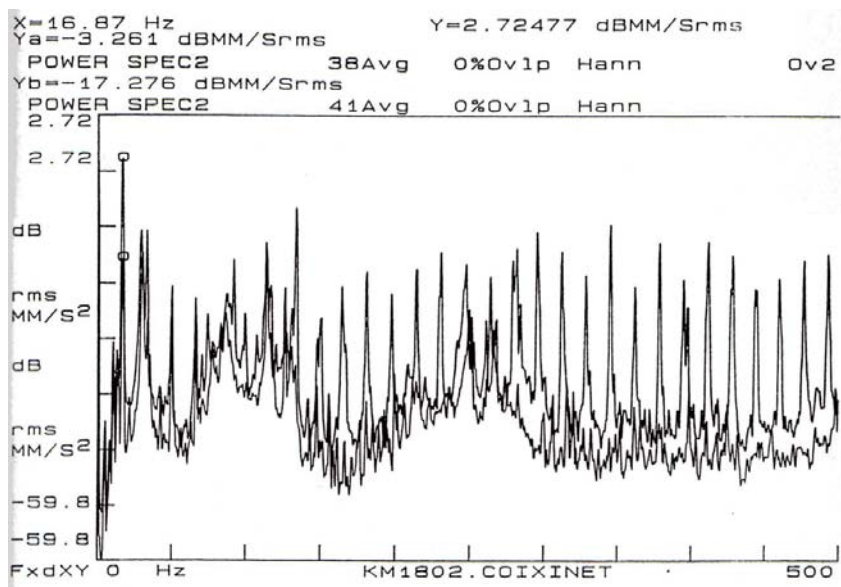


Figura 6.43.- Espectro en aceleración bomba con holgura.

Obsérvese una vez más la profusión de picos a media-alta frecuencia.



### 3.7. INFLUENCIA DE LA DIRECCIÓN DE REGISTRO DE LA VIBRACIÓN

En las figuras 6.44 y 6.45, se representan los espectros en aceleración de un reductor de mina con los rodamientos de rodillos del punto M1 en estado 3.

La figura 6.44 corresponde al espectro tomado en dirección horizontal, dentro de la zona de carga del rodamiento, aunque no en la zona de máxima carga.

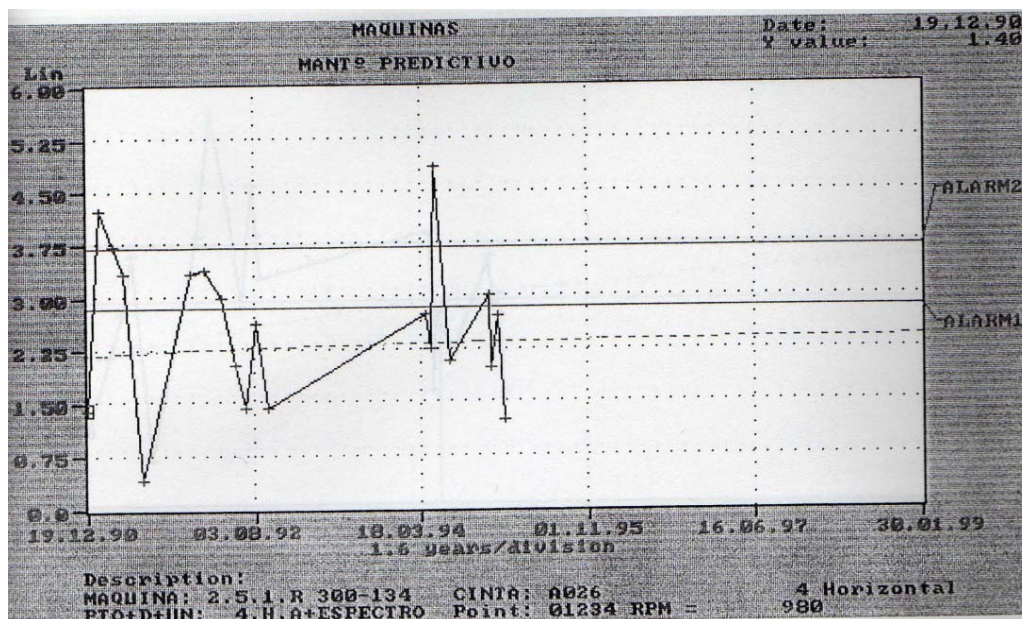


Figura 6.44.- Evolución temporal en horizontal.

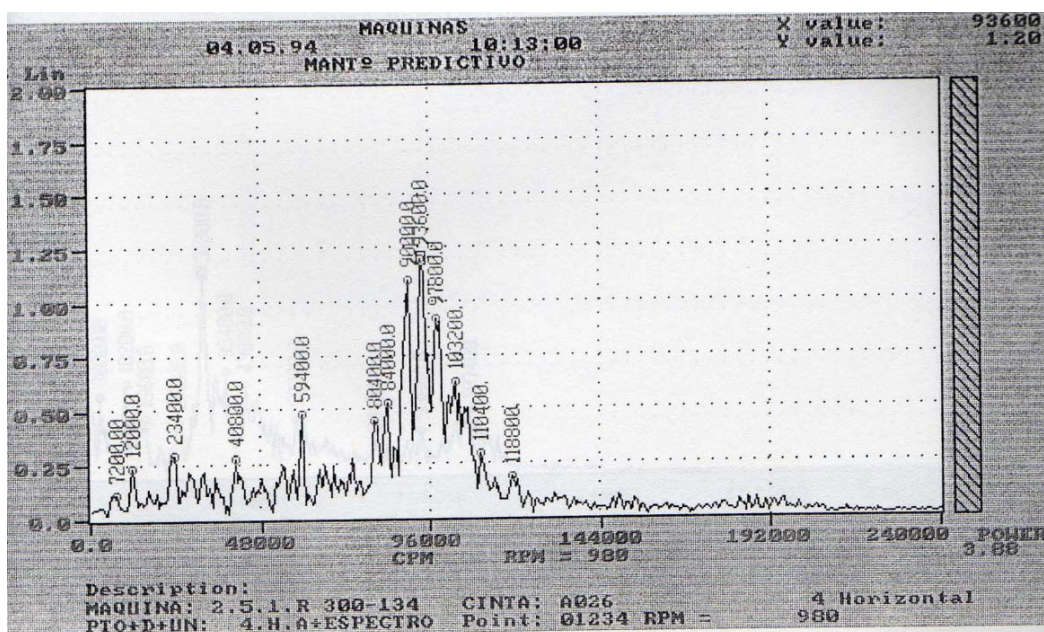


Figura 6.45.- Espectro en aceleración horizontal.

La figura 6.46 corresponde al espectro tomado en dirección vertical, en el mismo punto, fuera de carga del rodamiento.

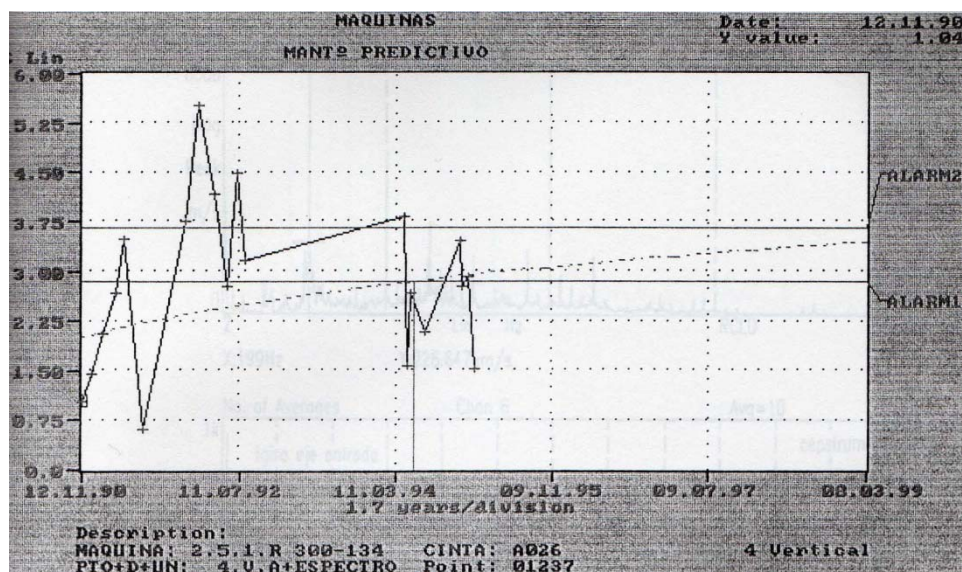


Figura 6.46.- Evolución temporal en vertical.

Obsérvese las diferencias de amplitud y de aspecto en la banda de rodamientos de rodillos, (alrededor de 96.000 cpm.), así como en los valores globales de aceleración.



Figura 6.47.- Espectro temporal.

Esto demuestra que la zona donde se sitúa el captador de vibraciones afecta enormemente a la calidad de la medida, debiendo colocarse siempre en las zonas de mayor carga de los rodamientos. Además, es especialmente importante dada la baja transmisibilidad de las altas frecuencias a través de los medios metálicos.



### 3.8. ESPECTRO DE RODAMIENTOS GRANDES

La figura 6.48 representa el espectro en velocidad de un tambor de arrastre de cinta transportadora girando a 65 rpm, con el rodamiento de diámetro interior 400 mm en mal estado.

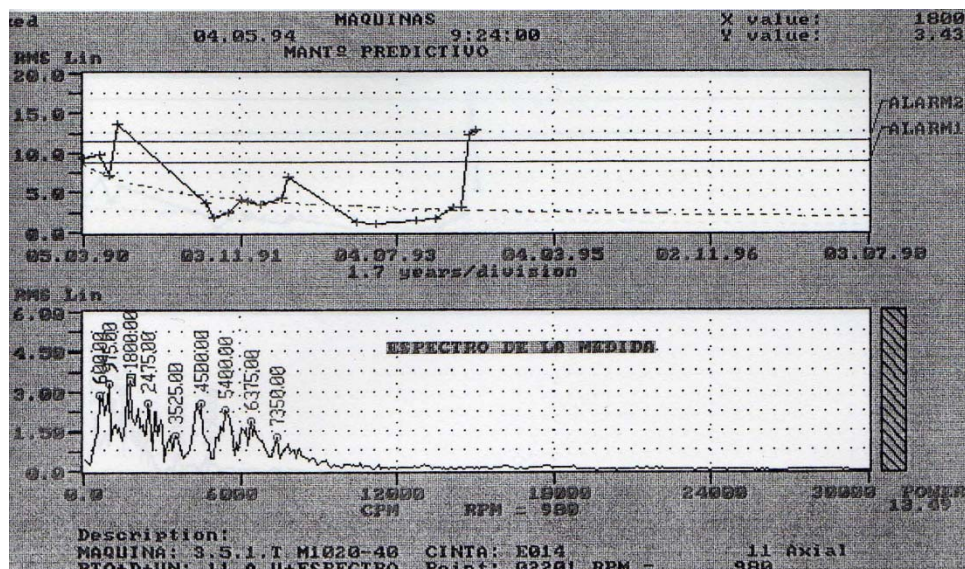


Figura 6.48.- Espectro en velocidad tambor de arrastre cinta transportadora.

En este caso, al tratarse de un rodamiento de grandes dimensiones, la banda de rodamiento se encuentra en la baja frecuencia.

Obsérvese la evolución de los espectros en la cascada espectral y la medida global de velocidad en la grafica de tendencia.

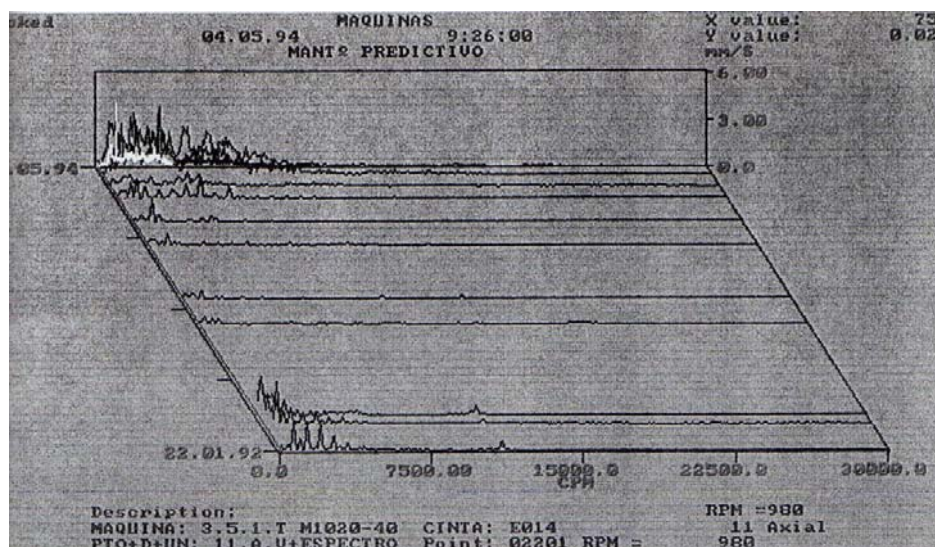


Figura 6.49.- Evolución espectro de la cascada espectral.



En cambio, si estudiamos el espectro en aceleración del mismo punto, podemos observar oscilaciones en el valor global de la aceleración, lo que permite detectar mejor la presencia del defecto:

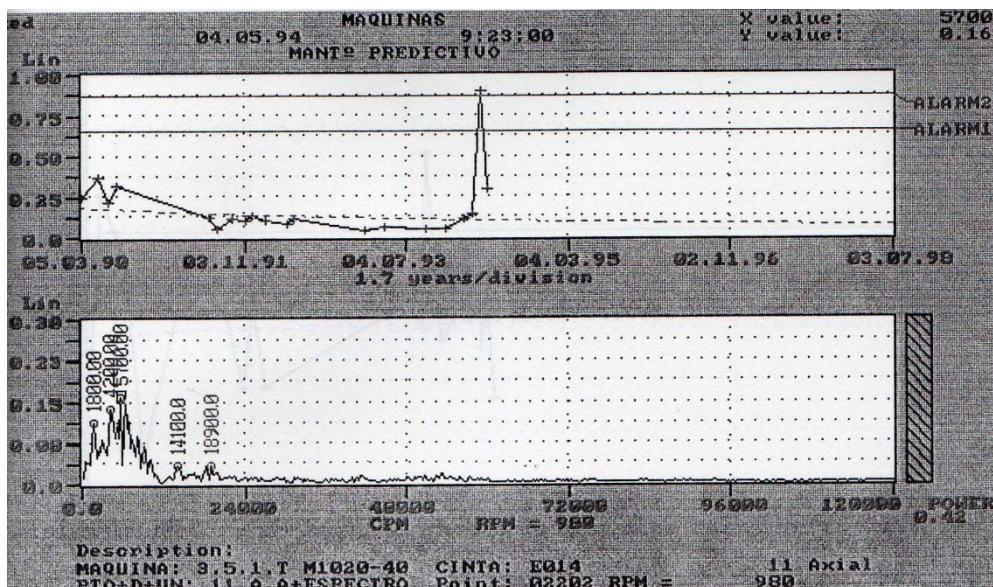


Figura 6.50.- Espectro en aceleración tambor de arrastre cinta transportadora.

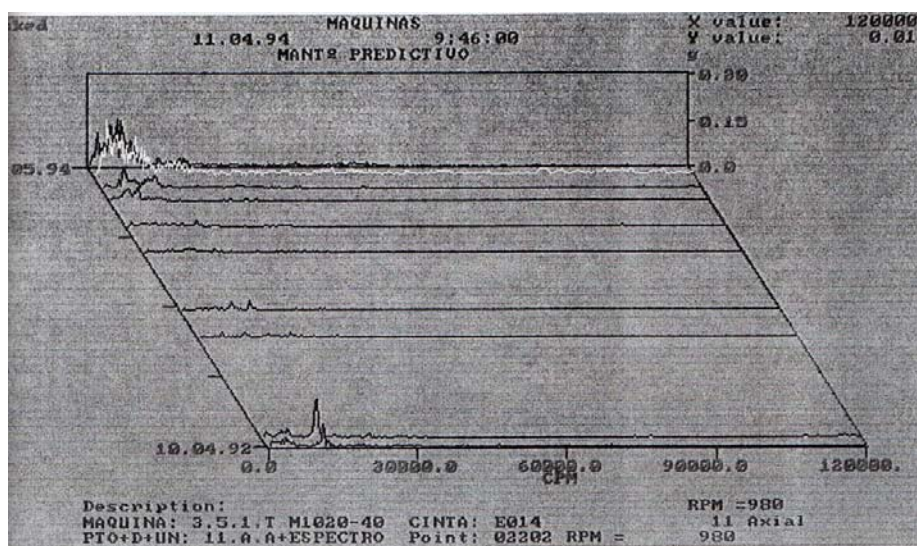


Figura 6.51.- Evolución espectro de la cascada espectral.

Por tanto, como podemos observar, en este tipo de rodamientos de gran tamaño y de baja velocidad, es más útil el parámetro velocidad que el de aceleración.

### 3.9. ESPECTROS DE RODAMIENTOS DE LAS BOMBAS DE AGUA

En las siguientes figuras se pueden ver los espectros, con una buena resolución (zoom), correspondientes a dos bombas de agua, tomados en una zona de montaje de rodamiento, antes y después de proceder al cambio del mismo por deterioro.

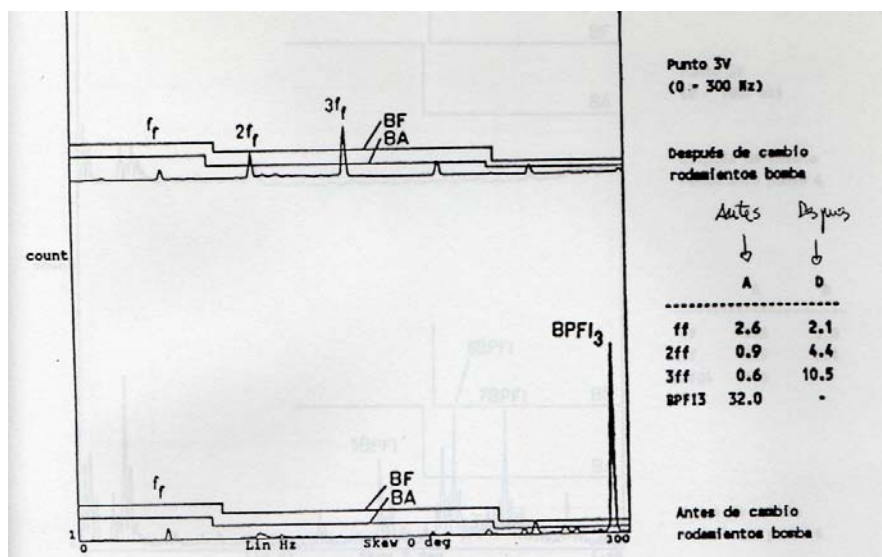


Figura 6.52.- Espectro bomba antes y después cambio rodamiento.

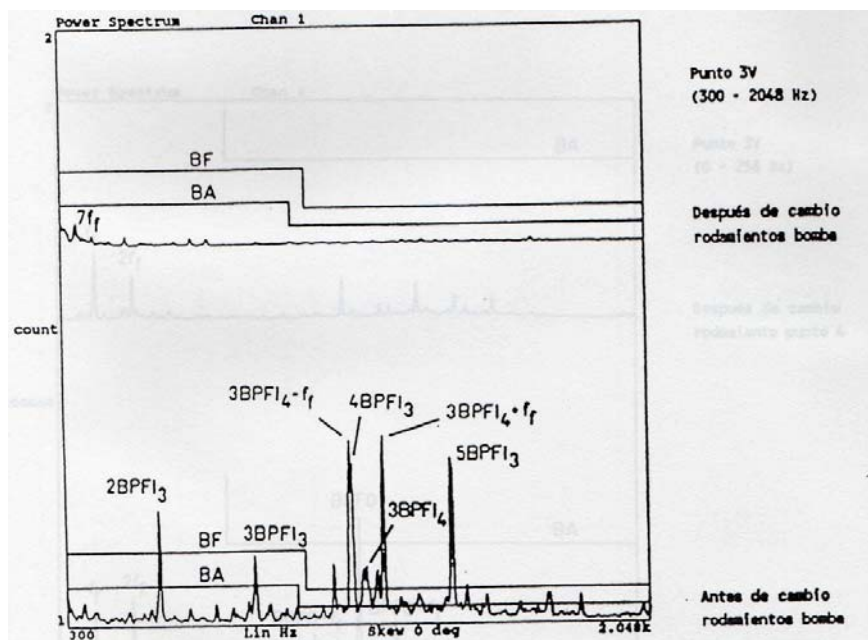


Figura 6.53.- Espectro bomba antes y después cambio rodamiento.

Se pueden observar en ambas figuras los picos correspondientes a las frecuencias rotacionales de defecto y sus bandas laterales antes del cambio de rodamiento y la desaparición de los mismos después del cambio de rodamientos.

Si vemos otro ejemplo similar pero para el rodamiento del punto 4:

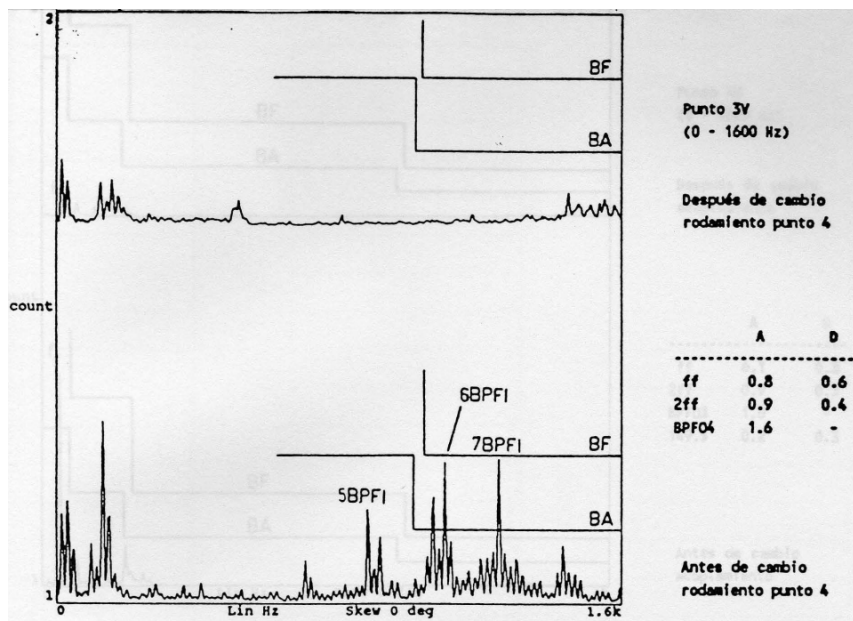


Figura 6.54.- Espectro rodamiento 4 antes y después cambio rodamiento.

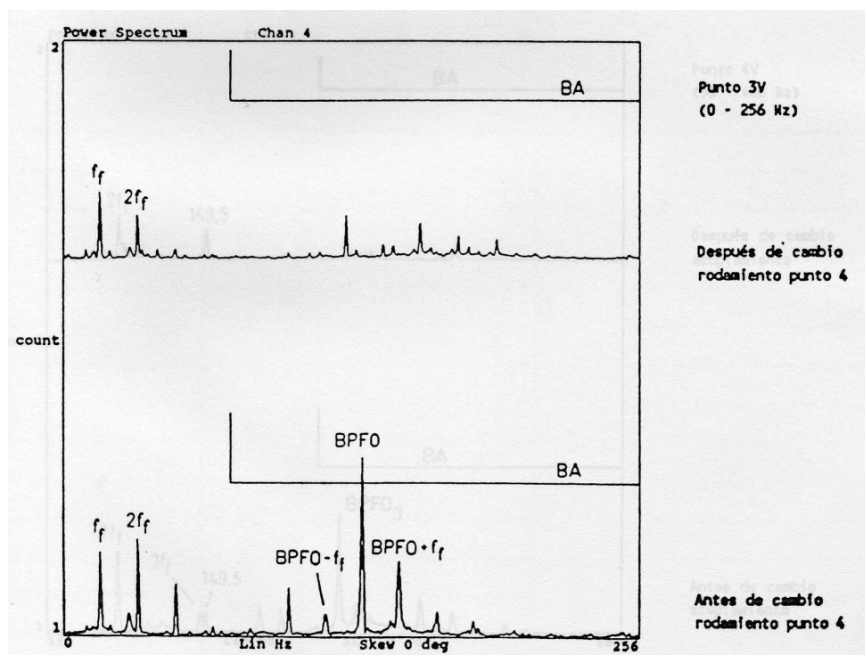


Figura 6.55.- Espectro rodamiento 4 antes y después cambio rodamiento.

En las siguientes figuras se presenta otro espectro de bomba de agua, pero ahora el daño se corresponde con un desalineamiento del eje de entrada, que excita también las frecuencias rotacionales de defecto y desaparecen al volver a realinear.



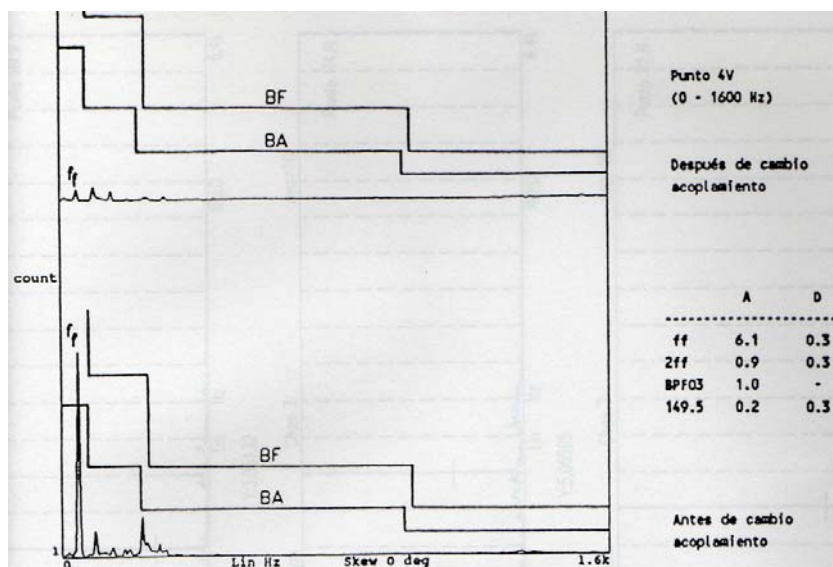


Figura 6.56.- Espectro de bomba con desalineamiento.

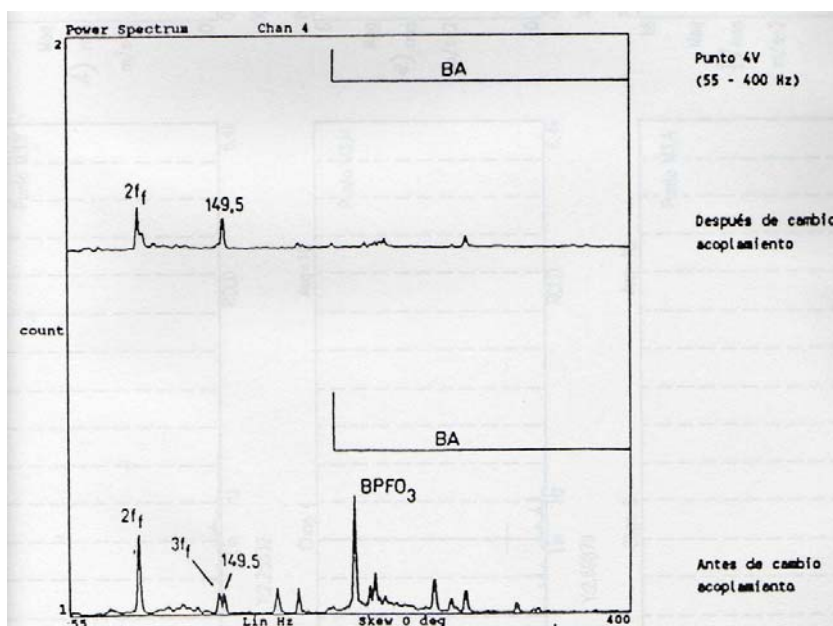


Figura 6.57.- Espectro de bomba con desalineamiento.

De los citados espectros de bombas, se puede deducir que cuando no existen engranajes, el nivel de ruido de fondo puede ser en algunos casos suficientemente bajo como para detectar en espectros, con una resolución adecuada, las frecuencias rotacionales de defecto, sin necesidad de recurrir a la demodulación que es siempre más tediosa, por la necesidad de localizar previamente las bandas de rodamientos.

Sin embargo, con engranajes por medio, ha de recurrirse siempre a la demodulación o en algunos casos al cepstrum, si se quieren localizar dichas frecuencias rotacionales.

#### **4. CONCLUSIONES**

Las características de la vibración que mejor identifican a estos defectos son las siguientes:

- La señal temporal bruta (sin tratar), solo es efectiva de cara a la detección de defectos en aquellos casos en que dichos defectos produzcan impulsos "limpios" al paso de los elementos rodantes sobre ellos (grietas transversales, cráter de pequeñas dimensiones, etc); de lo contrario, será necesario el tratamiento de dicha señal para eliminar frecuencias ajenas al defecto.
- Los defectos en rodamientos elevan los valores de aceleración y generalmente mantienen constantes los valores de velocidad de los espectros.
- La característica más sobresaliente, fiable y que mejor identifica los defectos de rodamientos con un estado de deterioro igual o superior al 2, es la elevación en el espectro de aceleración de las amplitudes en una banda de frecuencias alrededor de la frecuencia de resonancia del conjunto-montaje del rodamiento deteriorado. Además, en las bandas de los rodamientos dañados aparecen una gran cantidad de picos (tantos más cuanto más avanzado esté el defecto) que parecen indicar una gran actividad de modulación y/o de frecuencias aleatorias provocadas por los deslizamientos de los elementos rodantes sobre las pistas. Asimismo, se observa una elevación del ruido de fondo.
- A medida que el estado de deterioro del rodamiento va avanzando, las bandas de rodamientos se van ensanchando y van apareciendo otras nuevas más anchas en la zona de altas frecuencias, correspondientes a resonancias de los elementos más pequeños del rodamiento (elementos rodantes), carcasa, etc; finalmente, se acaban uniendo todas estas bandas hasta formar una sola.
- La holgura excesiva en el rodamiento, bien sea por desgaste de pistas y elementos rodantes, o por un apriete inadecuado, se manifestará en forma de gran cantidad de picos en una banda tan ancha como elevado sea el grado de holgura del rodamiento.
- En las cajas de engranajes, la vibración originada por los propios trenes de engranajes, sus armónicos y sus modulaciones, "tapan" las frecuencias rotacionales de defecto, labor de entorpecimiento en la detección del defecto, que es apoyada por el ruido de fondo provocado asimismo por los engranajes en buena parte, razón por la cual, para este tipo de máquinas, se ha de recurrir de entrada a la técnica de las bandas de rodamiento y a la demodulación o cepstrum de dichas bandas.



- Si sólo es suficiente saber si un rodamiento está deteriorado y el grado de deterioro aproximado, basta con vigilar la banda de rodamientos antes citada, y la técnica de bandas de rodamientos se convierte en la más sencilla.
- Para ayudar en la identificación de las bandas de defecto, se puede usar el filtrado vía cepstrum de las frecuencias síncronas ó TEMPSEL.
- La demodulación de las bandas de rodamientos es una técnica que profundiza con éxito en las causas del deterioro del rodamiento. La gran ventaja que tiene es que presenta de forma clara los picos correspondientes a las frecuencias rotacionales de defecto, así como sus armónicos y bandas laterales, identificándose así el tipo de defecto que presenta el rodamiento. Asimismo, la energía de modulación presente en la banda de rodamiento es proporcional al grado de deterioro del rodamiento. Sin embargo, su implementación tiene una cierta dificultad al ser necesario conocer de antemano las bandas de rodamientos, no siempre claras dentro del espectro. No se ensayó la técnica de espectros en S.E., por ser muy similar a la demodulación en la banda de rodamientos.
- El cepstrum tiene unas ventajas similares a las de la demodulación, pero el inconveniente de que el ruido de fondo, si es muy elevado, puede reducir e incluso anular la información suministrada por dicha técnica y lo mismo ocurre si la resolución del espectro no es la adecuada.
- Las variaciones de carga en la caja de engranajes, el cuidado que se haya tenido a la hora de tomar la medida y sobre todo, la localización del transductor con respecto a la zona de carga del rodamiento, afectan significativamente los resultados de los espectros. Como norma general, se debe tomar la señal de vibración siempre en las mismas o similares condiciones de carga y en la zona más próxima a los mayores esfuerzos soportados por el rodamiento.
- Si los rodamientos giran a velocidades medias o altas, el espectro global ha de ser ejecutado en unidades de aceleración.

Si el rodamiento es muy voluminoso y gira a baja velocidad, puede ser conveniente ejecutar el espectro en unidades de velocidad. En estos casos en los que las técnicas espectrales introducen un ruido elevado, las técnicas del tipo VISDITEMP o TEMPSEL son muy efectivas.

- La técnica de medición del Spike-Energy, aplicada a la detección de daños en rodamientos, no dio resultados positivos en las cajas de engranajes, debido al solape de frecuencias medias/altas originadas por engranajes y rodamientos. Una adaptación de



esta técnica y de la de espectros en S.E. podría dar resultados positivos en las cajas de engranajes.

**Las zonas extremas de los espectros** (bandas de baja y alta frecuencia), son extraordinariamente sensibles a los ruidos, tanto los procedentes de equipo electrónico como del manejo inadecuado de captadores, cables, interface captador/maquina, etc, por lo que se han de extremar los cuidados en estos casos y elegir cuidadosamente los instrumentos (captadores, analizadores, cables, técnica, etc).

Como reglas generales, ha de tenerse en cuenta que:

- a.- Las altas frecuencias ( $f \geq 240000$  c.p.m.) se atenúan rápidamente cuanto mayor sea el camino recorrido en un medio metálico, transmitiéndose bien en medios gaseosos (aire).
- b.- Las bajas frecuencias, ( $f \leq 300$  c.p.m.), se atenúan rápidamente en un medio gaseoso (aire), transmitiéndose bien en los medios metálicos.
- c.- Las integraciones y sobre todo las derivaciones realizadas electrónicamente, introducen bastante ruido, sobre todo en las altas y bajas frecuencias.
- d.- Las sensibilidades de las medidas mejoran enormemente, cuando se mide en parámetros de desplazamiento para las bajas frecuencias y de aceleración en las altas frecuencias. En las frecuencias medias, el parámetro más apropiado es la velocidad.
- e.- Se ha de cuidar de que el rango dinámico sea el adecuado para evitar truncamientos de la señal.
- f.- Los circuitos de acondicionamiento de la señal han de tener un umbral de ruido y un límite de frecuencia, lo más bajo posible.
- g.- Con el fin de minimizar los ruidos externos, es importante tomar un gran número de promedios que se superpongan (8 o más).

#### Mapas resumen y conclusiones sobre los defectos asíncronos en rodamientos.

Por último, es importante reseñar los gráficos que se han elaborado a modo de resumen para el tratamiento y la caracterización de los defectos asíncronos en rodamientos, con sus características principales y técnicas a usar.

Se ha elaborado un mapa de defectos en rodamientos (tabla 6.1) con los síntomas que los identifican a través de las vibraciones y con las técnicas de análisis más adecuadas a aplicar en cada caso.

TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO	SÍNTOMAS
<b>Espectro global en aceleración (o velocidad para bajas rpm)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elevación de amplitudes de aceleración en la banda de resonancia del rodamiento.</li> <li>- Potencia elevada en la banda del rodamiento deteriorado.</li> <li>- Aparición d gran cantidad de picos en la banda del rodamientos deteriorado, tantos más cuanto mayor sea el grado de defecto. Si el defecto consiste en una holgura excesiva del rodamiento, el número de picos se multiplicará.</li> <li>- Ruido de fondo elevado, más elevado cuanto mayor sea el grado de desarrollo del defecto.</li> <li>- A mayor grado del defecto, mayor anchura de la banda de rodamientos, que puede llegar a abarcar hasta las altas frecuencias.</li> <li>- Las variaciones de carga y los ruidos afectarán a las amplitudes en la banda de rodamientos, sobre todo si estas se encuentra en las altas o bajas frecuencias.</li> <li>- Diversos defectos de montaje de engranajes, excitan las bandas de los rodamientos que sostienen al eje o ejes defectuosos.</li> </ul>
<b>Spike-Energy</b>	Esta técnica, tal y como está actualmente desarrollada no ofrece garantías en las cajas de engranajes.
<b>Demodulación de las bandas de rodamientos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exige tener localizadas con cierta exactitud las bandas de resonancia de los rodamientos, para lo cual se puede usar la técnica de filtrado vía CEPSTRUM de las frecuencias síncronas (TEMPSEL)</li> <li>- Detecta bandas laterales correspondientes a las frecuencias rotacionales de defecto del rodamiento.</li> <li>- La energía de modulación presente en la banda del rodamiento deteriorad es proporcional al grado de deterioro del rodamiento.</li> </ul>
<b>Cepstrum de la banda de rodamientos</b>	Inefectivo cuando el ruido del espectro es muy elevado y cuando la resolución es baja.
<b>Temporal VISDITEMP TEMPSEL</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sin tratamiento de la señal, sólo es efectiva para defectos aislados y de tipo monoimpulsivo.</li> <li>Con tratamiento de la señal, es especialmente útil para rodamientos que giren a bajas velocidades</li> </ul>

Tabla 6.1.- Síntomas de defecto y técnicas apropiadas.

Asimismo, se confeccionaron los modelos espectrales (firmas), que cabe esperar para cada uno de los defectos analizados, (fig. 6.58).

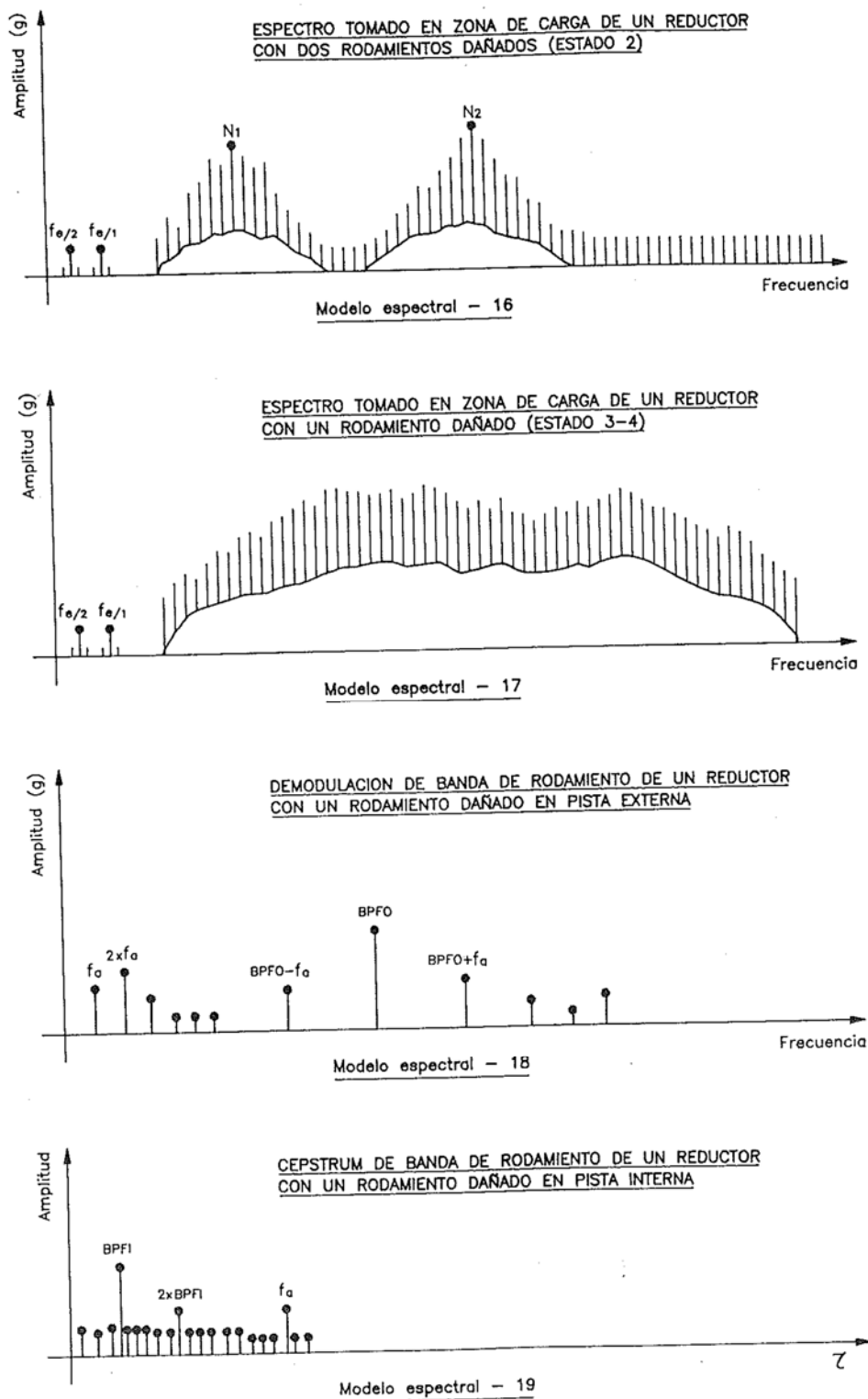


Figura 6.58.- Modelos espectrales de defectos estudiados.

Finalmente, se elaboró un diagrama lógico de diagnóstico (fig. 6.59), aplicable a este grupo de defectos, en el que figuran unas constantes a definir para cada tipo de máquina.

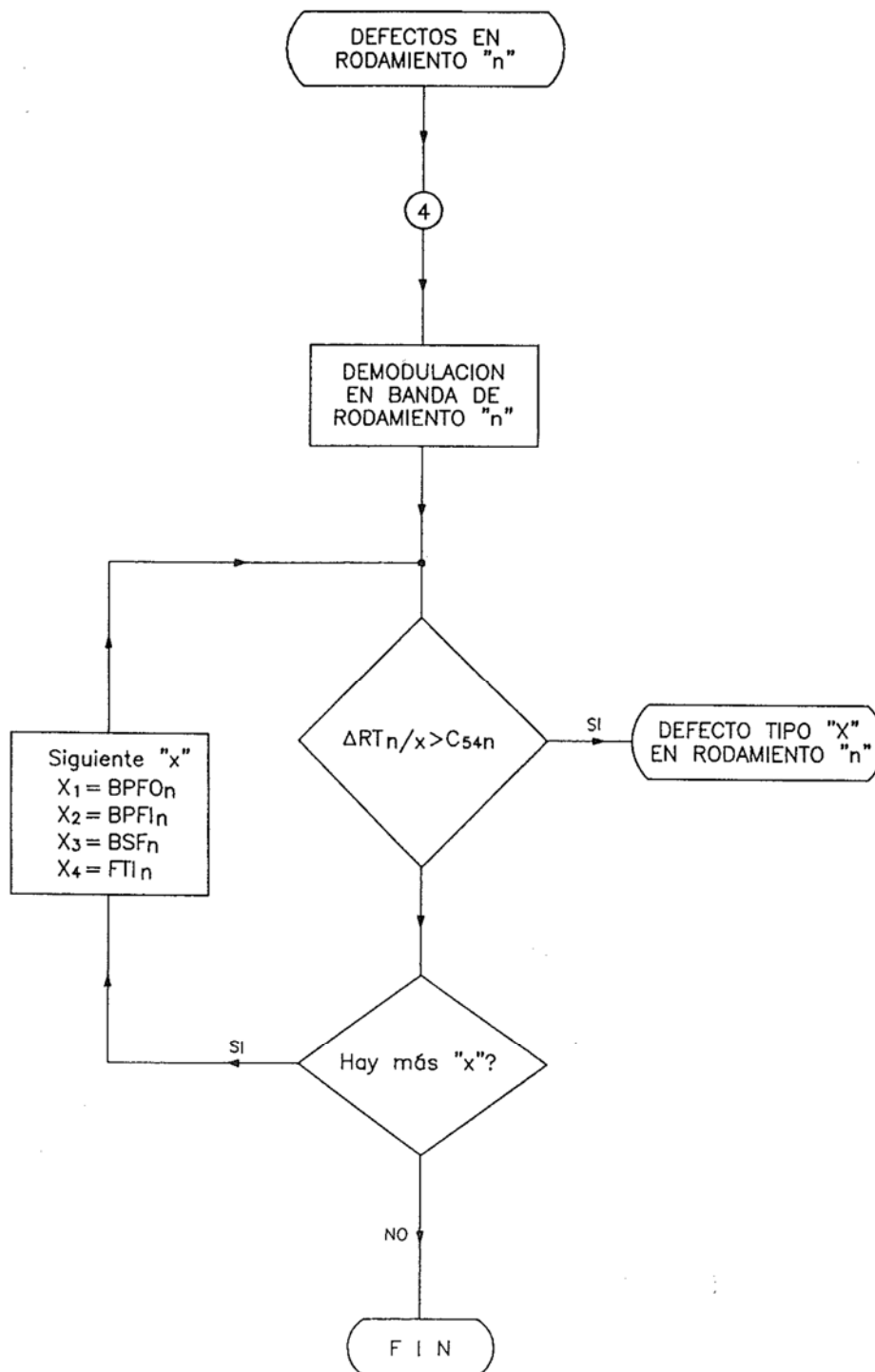


Figura 6.59.- Diagrama lógico de diagnóstico.

## **5. OTRAS APORTACIONES**

Aparte de la diagnosis de rodamientos, algunos de los hitos más importantes conseguidos en esta tesis fueron:

1. Como fase previa de la investigación, se llevó a cabo un amplio y exhaustivo estudio del comportamiento del banco de ensayos: localización de frecuencias naturales de la estructura y de los elementos auxiliares, determinación de puntos y direcciones de medida más adecuados.
2. Jerarquización del trabajo de acuerdo con las fases de ejecución del mantenimiento predictivo, separando las fases de detección y diagnosis de daños, aunque se terminen entrelazando.
3. Ensayo de diferentes técnicas de análisis de amplitud aplicadas en la fase de detección de daños en cajas de engranajes, obteniendo importantes conclusiones.
4. Establecer una clasificación de los daños o defectos que aparecen en cajas de engranajes en síncronos (parte periódica) y asíncronos (parte aleatoria).

El tipo de defecto determinará las técnicas a usar, la gravedad de los daños y la vida residual del elemento. Además, la separación del espectro en frecuencias síncronas y asíncronas permitirá una mayor claridad de los espectros.

5. Desarrollo de la Técnica de Espectros Selectivos, para la separación de las frecuencias síncronas y asíncronas.
6. Ensayo en banco de ensayos y en reductores prototipo de los defectos más comunes que se dan en las cajas de engranajes, logrando explicar la causa/efecto de un buen número de daños, las técnicas más adecuadas para su diagnosis, y la localización de los síntomas identificativos de cada uno de los daños.
7. Desarrollo de nuevas técnicas para el análisis de daños asíncronos en engranajes: Visual Directa en el dominio temporal (VISDITEMP), Temporal Selectiva (TEMPSEL), y Frecuencial Selectiva (FRECSEL). En particular, la técnica TEMPSEL ha dado resultados excelentes.



8. Elaboración de mapas y modelos espectrales para los daños más significativos de las cajas de engranajes, con las técnicas más adecuadas y sus síntomas, y diagramas lógicos de detección y diagnóstico con los diferentes daños a partir de la acotación de una serie de variables. Estos gráficos sientan la base de un análisis cuantitativo para su tratamiento por ordenador, donde se ha desarrollado los algoritmos necesarios en MATLAB.

## **6. FUTUROS DESARROLLOS**

- Aplicación de las técnicas TEMPSEL y FRECSEL, convenientemente adaptadas, a la diagnosis de daños en rodamientos que giran a baja velocidad (<100rpm).
- Extensión del trabajo de investigación a otros defectos menos comunes de las cajas de engranajes, como son:
  - \* Montaje defectuoso de rodamientos (apriete, huelgo, etc).
  - \* Profundización en el daño de pitting en engranajes.
- Extensión del trabajo de investigación a cajas de engranajes con trenes planetarios.
- Desarrollo de una base de datos de diagnosis de daños en cajas de engranajes, siguiendo las directrices marcadas en los diagramas lógicos preparados para este trabajo.
- Fijación de unos índices de gravedad para cada grado de defecto y sus correspondientes vidas remanentes.
- Una adaptación de la técnica de medición del Spike-Energy y de la de espectros en S.E. aplicada a la detección de daños en rodamientos, podría dar resultados positivos en las cajas de engranajes.





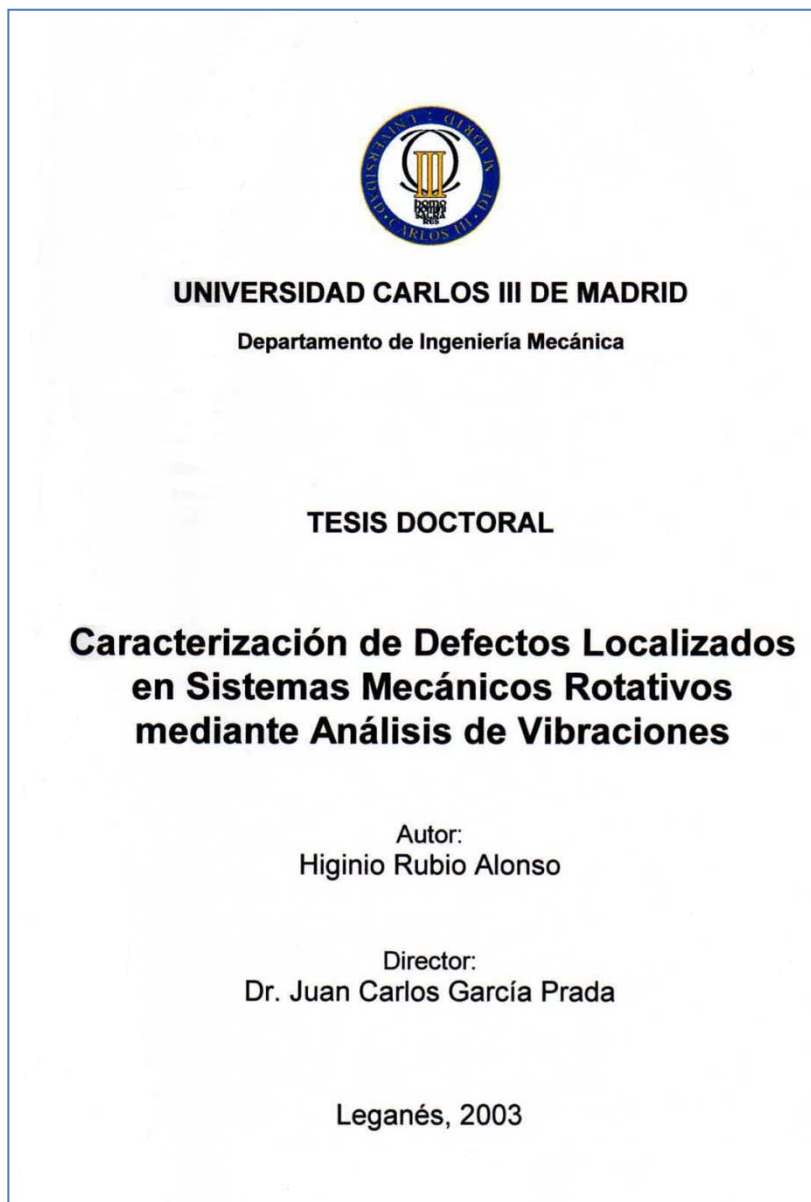


## **TEMA 7 :**

### **TESIS DOCTORAL DE HIGINIO RUBIO ALONSO**



Desde un punto de vista cronológico, la segunda tesis doctoral con la que vamos a trabajar pertenece a Higinio Rubio Alonso. El título de la misma es: “Caracterización de defectos localizados en sistemas mecánicos rotativos mediante análisis de vibraciones”. Está fechada en Junio 2003.



Se centra en el estudio de las características y la evolución de la señal vibratoria generada por un rodamiento con un fallo localizado y de tamaño progresivo.



## **1. CONDICIONES DE MEDICIÓN Y RODAMIENTOS UTILIZADOS**

El estudio se centra en la evolución de la señal vibratoria generada por un rodamiento con un fallo localizado y de tamaño progresivo, centrándose principalmente en el caso del defecto en la pista de rodadura del anillo interior de un rodamiento de contacto angular.

Para realizar el análisis se partirá de los modelos teóricos de vibraciones conocidos, correspondientes a defectos en rodamientos y las características teóricas de las técnicas conocidas de tratamiento y análisis de las señales.

Se van a realizar ensayos sobre los siguientes elementos:

1. Rodamientos FAG 7206 B en el banco de ensayos.
2. Caja de engranajes sobre el banco modelo de reductor industrial.

Además, se compararán los resultados obtenidos con las simulaciones que se van a realizar en ALGOR y MATLAB.

Respecto a la generación de defectos se ha realizado:

- En el caso de los defectos en las pistas de rodadura, se hace una marca pequeña sobre la pista (del anillo interior o exterior), se mide con el pie de rey la distancia a desbastar y se hace una segunda marca. Finalmente, se desbasta con el botador la superficie del camino de rodadura comprendida entre las dos marcas.
- En el caso de defecto en la bola, se le proporcionan a una de las bolas unos arañazos sobre toda la superficie de la bola o bien un área localizada.

El “defecto leve” será de poca profundidad, equiparables a marcas, desconchados superficiales o “micropittings”, y el “defecto grave” tendrán las mismas anchuras, pero con una mayor severidad, asegurando un defecto más profundo e irregular en su extensión, emulando un desconchado típico.

## 1. BANCO DE ENSAYOS DE RODAMIENTOS

Para verificar prácticamente la utilidad de los modelos teóricos conocidos en rodamientos se procederá a aplicarlos a casos reales, para lo cual se realizaron ensayos de medida de la señal de vibración de los rodamientos FAG 7206 B con fallo conocido en un **banco de ensayos** construido a tal fin.



Figura 7.1.- Banco de ensayos de rodamientos.

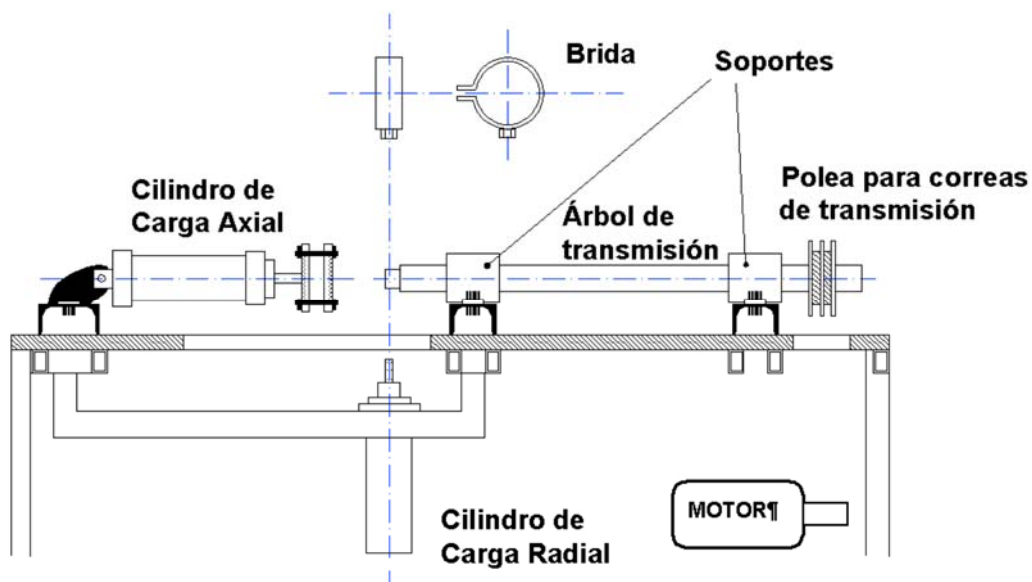


Figura 7.2.- Elementos que componen el banco de ensayos de rodamientos.

El aire comprimido procedente de un pequeño compresor de 1 Kw. de potencia y una capacidad de compresión a 0,8 MPa. de 0,1 m<sup>3</sup>/minuto permite accionar los dos cilindros neumáticos que proporcionan carga sobre el rodamiento.

Modelo	Unidad	M-547-SA-100 (d. radial)	M-547-SA-100 (d. axial)
D. cilindro	mm.	64	64
D. vástago	mm.	25,4	25,4
Fuerza de avance	N.	2500	2500
Fuerza de retroceso	N.	2200	2200
Carrera	mm.	100	150

Tabla 7.1.- Características de los cilindros neumáticos.

El motor del banco de ensayos es un motor trifásico comercial de 0,75 KW, rotor en cortocircuito, de 4 polos y 50 Hz. con una velocidad en sincronismo de 1.500r.p.m., cuya velocidad es regulada variando la frecuencia de giro. El par nominal es de 5,23 Nm.

El variador de velocidad es de la firma comercial NOVAT, modelo DMO, para una tensión de alimentación monofásica de 220 V., con salida a motor de 0,75 KW de 3x 220V y con las correspondientes protecciones internas a cortocircuitos en la salida, fugas a tierra y tensión de red excesiva o transitorios. Dispone de dispositivos de regulación y control de la aceleración y deceleración.

La frecuencia de la corriente de salida puede modificarse de 0 a 120 Hz. con lo que se consigue la correspondiente variación de velocidad, alcanzándose las 3.600 r.p.m. en motores de cuatro polos.

## 2. MODELO DE REDUCTOR INDUSTRIAL

Estos conocimientos teóricos serán comprobados, también prácticamente, sobre otro banco de ensayos (un **modelo de reductor industrial** montado sobre una estructura rígida), siendo corregidos adecuadamente a partir del análisis posterior de los resultados obtenidos, permitiendo la generación de modelos y técnicas nuevas de detección. Para ello, se ensayarán cada uno de los defectos o daños elegidos en el elemento mecánico seleccionado, empleando la reductora industrial como banco de ensayos.



**Figura 7.3.- Banco de ensayos, modelo a escala de un grupo accionador industrial.**

Se compone de los siguientes elementos:

- Motor eléctrico C. A. trifásico, de 2,5 CV, con regulación continua de velocidad por variación de frecuencia (desde 0 a 1500 r.p.m.) y freno eléctrico.
- Acoplamiento elástico tipo Samiflex, para acoplar el motor con el reductor y el reductor con la bomba de pistones.
- Estructura soporte de elevada rigidez y apoyada en silentblocks.
- Simulador hidráulico de carga con regulación continua de par.
- Autómata Siemens para el control del sistema (velocidad, frecuencia, consumo de potencia, etc.).

Sobre este banco se va a ensayar la caja de engranajes o sistema reductor que hemos visto en el tema 5, que está compuesto por un grupo de engranajes cónicos, un grupo de engranajes cilíndrico-helicoidales, rodamientos, ejes, soportes, carcasa, etc.



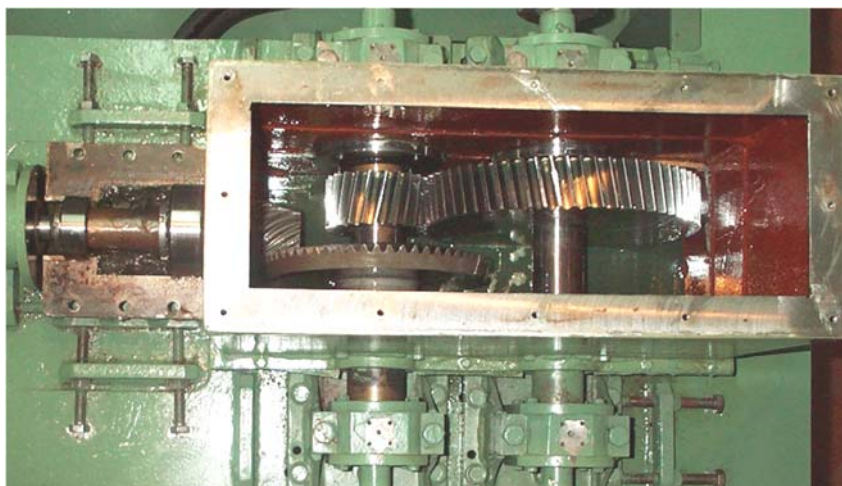


Figura 7.4.- Caja de engranajes del banco de ensayos.

Monta los siguientes rodamientos:

- Eje de entrada:

R1 = SKF 3206 A. Rodamiento de bolas de contacto angular.

R2 = SKF 22308 EK. Rodamiento autoalineable, de doble fila de rodillos esféricos a rótula.

- Eje intermedio:

R3 = SKF 22208 CC. Rodamiento autoalineable, de doble fila de rodillos esféricos a rótula.

R4 = SKF NU208 EC. Rodamiento de rodillos cilíndricos.

- Eje de salida:

R5 = SKF 6208. Rodamiento rígido de bolas.

R6 = SKF NU208 EC. Rodamiento de rodillos cilíndricos.

### 3. SIMULACIONES ALGOR Y MATLAB

**Se aprovecharán estos defectos reales** para comparar los resultados con los obtenidos del análisis de los ensayos en la bancada de rodamientos y los conseguidos mediante ensayos de **simulación** usando modelos implementados en códigos **ALGOR y MATLAB**.

Aunque es una parte muy importante de la tesis y que abre un campo de investigación muy amplio para trabajos posteriores, desgraciadamente no lo podemos tratar en este proyecto porque no es la parte que nos ocupa.

## **2. TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO**

A continuación se enumeran las técnicas de tratamiento de las señales de vibración empleadas, resaltando con caracteres en negrita aquellas que conllevan novedades, ya sea su originalidad de diseño o de aplicación.

### TRATAMIENTO DE LA SEÑAL VIBRATORIA

#### Técnicas en el dominio temporal.

- A1 Análisis de la señal temporal.
- A2 Análisis de la señal temporal ampliada.
- A3 Análisis de la envolvente de la señal temporal.**
- A4 Análisis de la envolvente de la señal de PeakVue.**

#### Técnicas en el dominio de la amplitud.

- B1 Análisis de la evolución de parámetros estadísticos.
- B2 Análisis de la evolución de la potencia espectral global.**
- B3 Análisis de la evolución de la potencia espectral a frecuencias selectivas.**
- B4 Análisis de la evolución del Spike-Energy total.

#### Técnicas gráficas.

- C1 Análisis del espectro de potencia.
- C2 Análisis del mapa de espectros de potencia.**
- C3 Análisis de los picos mayores del espectro de potencia.**
- C4 Análisis de los picos acumulados en bandas de frecuencia del espectro de potencia a varias velocidades.**
- C5 Análisis del espectro de potencia de la envolvente.**
- C6 Análisis del espectro de potencia del PeakVue.**
- C7 Análisis del Cepstrum.
- C8 Análisis de diagramas tiempo-frecuencia planos.**
- C9 Análisis de diagramas tiempo-frecuencia tridimensionales.**

### **3. ENSAYOS REALIZADOS**

A continuación hay una relación de los ensayos realizados en el banco de ensayos, la reductora y las simulaciones. En este proyecto no vamos a poder encarar todos los ensayos realizados, así que nos vamos a centrar en las técnicas, intentando explicar el ámbito de aplicación de cada una y dar algún ejemplo para ilustrarla.

Los ensayos realizados son:

#### **RESULTADOS OBTENIDOS EN EL BANCO DE RODAMIENTOS**

Resultados para rodamientos con defecto en el anillo interior

Defectos de tamaño variable

Técnicas en el dominio temporal: A1, A2 y A3.

Técnicas en el dominio de la amplitud: B1, B2, B3 y B4.

Técnicas gráficas: C1, C5, C7, C8 y C9.

Carga axial y radial variable

Técnicas en el dominio temporal: A1, A2, A3 y A4.

Técnicas en el dominio de la amplitud: B1, B2 y B3.

Técnicas gráficas: C1, C5, C6 y C7.

Defectos de tamaño variable y velocidad variable

Técnicas en el dominio temporal: A1, A2 y A3.

Técnicas en el dominio de la amplitud: B1, B2 y B3.

Técnicas gráficas: C1, C5, C6 y C7.

Resultados para rodamientos con defecto en el anillo exterior

Varias localizaciones del defecto

Técnicas en el dominio temporal: A1, A2 y A3.

Técnicas en el dominio de la amplitud: B2 y B3.

Técnicas gráficas: C1, C5 y C9.

Resultados para rodamientos con defecto en la bola

Dos tipos de defecto

Técnicas en el dominio temporal: A1, A2 y A3.

Técnicas en el dominio de la amplitud: B2 y B3.

Técnicas gráficas: C1, C5 y C9.

## RESULTADOS OBTENIDOS EN LA REDUCTORA

Resultados del proceso de selección del punto de medida

Técnicas en el dominio de la amplitud: B2 y B3.

Técnicas gráficas: C1.

Características espectrales de la reductora

Se exponen tabuladas las frecuencias determinísticas de defecto en la reductora para las diferentes velocidades operativas.

Resultados de los ensayos con defectos conocidos

Resultados de aplicar desalineamiento en el eje de entrada

Técnicas en el dominio de la amplitud: B2 y B3.

Técnicas gráficas: C1, C2 Y C5.

Resultados de aplicar un defecto en un diente del piñón de eje de entrada

Técnicas en el dominio de la amplitud: B2 y B3.

Técnicas gráficas: C1, C3, C4, C5 y C7.

Resultados de aplicar un defecto en el rodamiento

Resultados de los ensayos preliminares

Técnicas en el dominio de la amplitud: B2 y B3.

Técnicas gráficas: C1 y C5.

Resultados de los ensayos finales

Técnicas en el dominio de la amplitud: B2 y B3.

Técnicas gráficas: C1 y C5.

## RESULTADOS OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN

Resultados de la simulación de eventos. Código ALGOR.

Defectos en pista interior, pista exterior y elemento rodante de tamaño y forma variable

Técnicas en el dominio temporal: A1 y A2.

Técnicas en el dominio de la amplitud: B2 y B3.

Técnicas gráficas: C1 y C5.

Resultados de la simulación matemática. Código MATLAB.

Presentación de resultados de la aplicación de tratamiento de señales vibratorias, ADEVI.

Simulación de defectos en pista interior, en pista exterior y en elemento rodante de tamaño variable y para gran cantidad de condiciones

Técnicas en el dominio temporal: A1, A2 y A3.

Técnicas en el dominio de la amplitud: B1, B2 y B3.

Técnicas gráficas: C1 y C5.

### **3.1. TÉCNICAS EN EL DOMINIO TEMPORAL**

Un resumen de las 4 técnicas del dominio temporal puede verse en la figura:

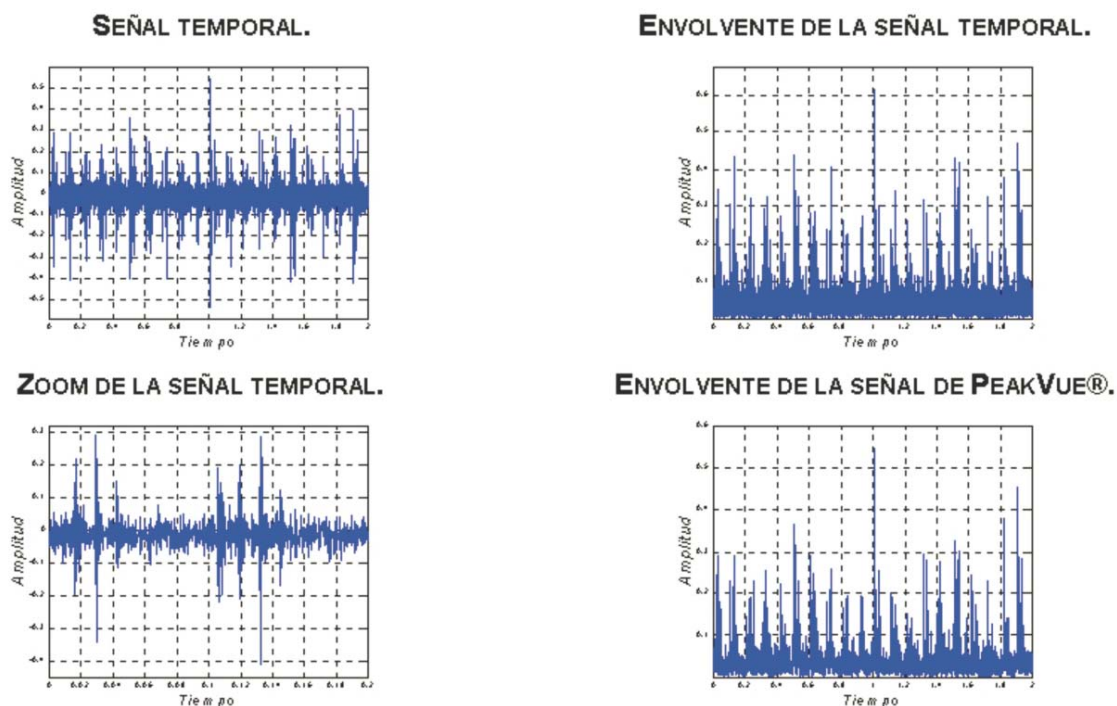


Figura 7.5.- Ejemplo de las gráficas temporales para el estado de carga: FRADIAL = 6 bar y FAXIAL = 6 bar.

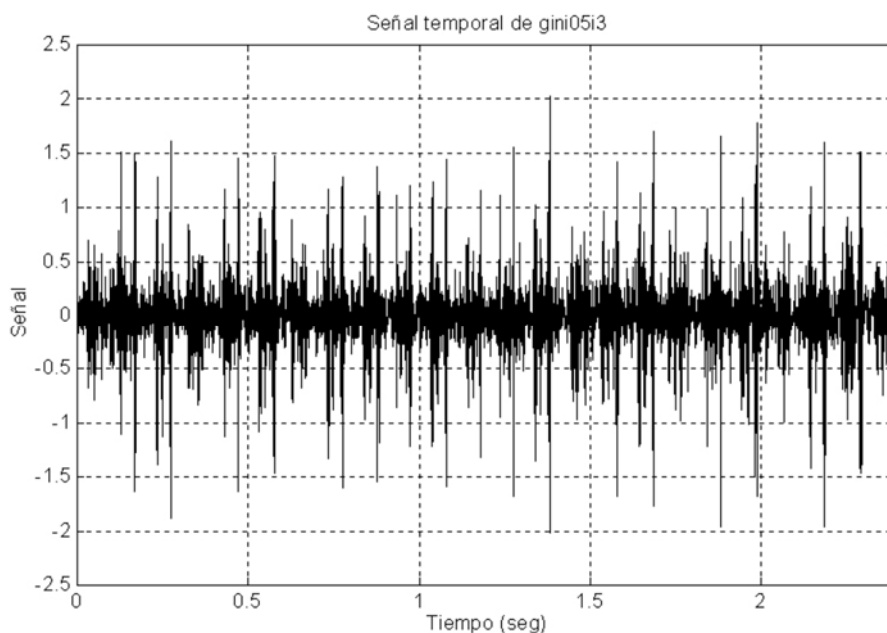
Veremos ahora las técnicas una a una:

#### **A1 Análisis de la señal temporal.**

Esta técnica se basa en el hecho de que cada defecto produce una emisión vibratoria característica, identificables al observar las variaciones de las aceleraciones (vibraciones) en el dominio temporal.

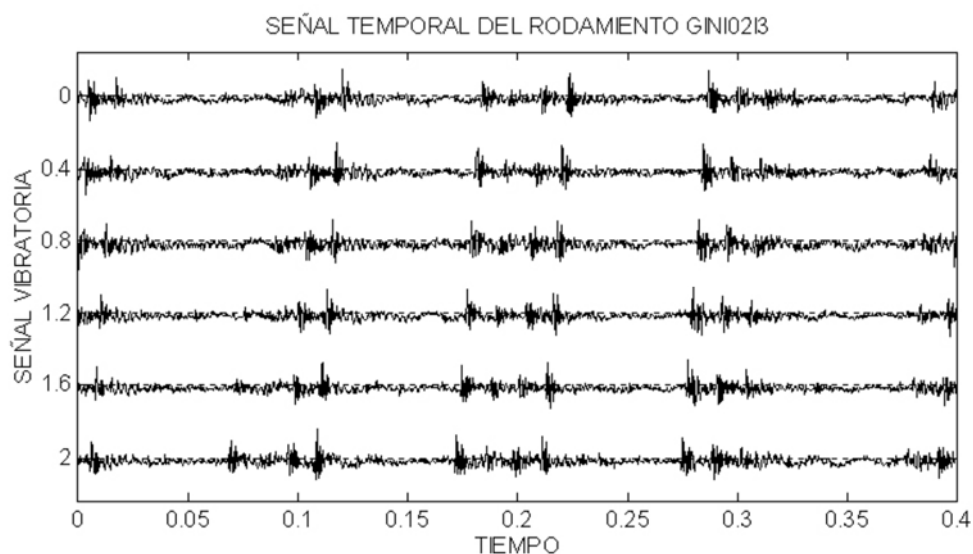
Esta técnica es sólo aplicable en sistemas cuya componente determinista de un defecto es muy superior a las componentes aleatorias: fallos que producen un elevado nivel vibratorio, o en bancos de pruebas de elementos mecánicos (menor nivel de ruido).

En la figura 7.6 se muestra la señal temporal de vibración generada por un rodamiento con un tamaño de defecto de 5mm.



**Figura 7.6.- Señal temporal de vibración correspondiente a un registro del rodamiento Gini05i3.**

En la figura 7.7 se muestra la señal temporal como una sucesión de tramos.



**Figura 7.7.- Evolución (como sucesión de tramos) de la señal vibratoria en el tiempo de un registro del rodamientos con nivel de defecto de 5 mm.**

Este no es un método totalmente eficaz y autosuficiente de diagnóstico, pues no aporta una información plena a cerca del estado del rodamiento, pero combinado con otras técnicas puede complementar el análisis.



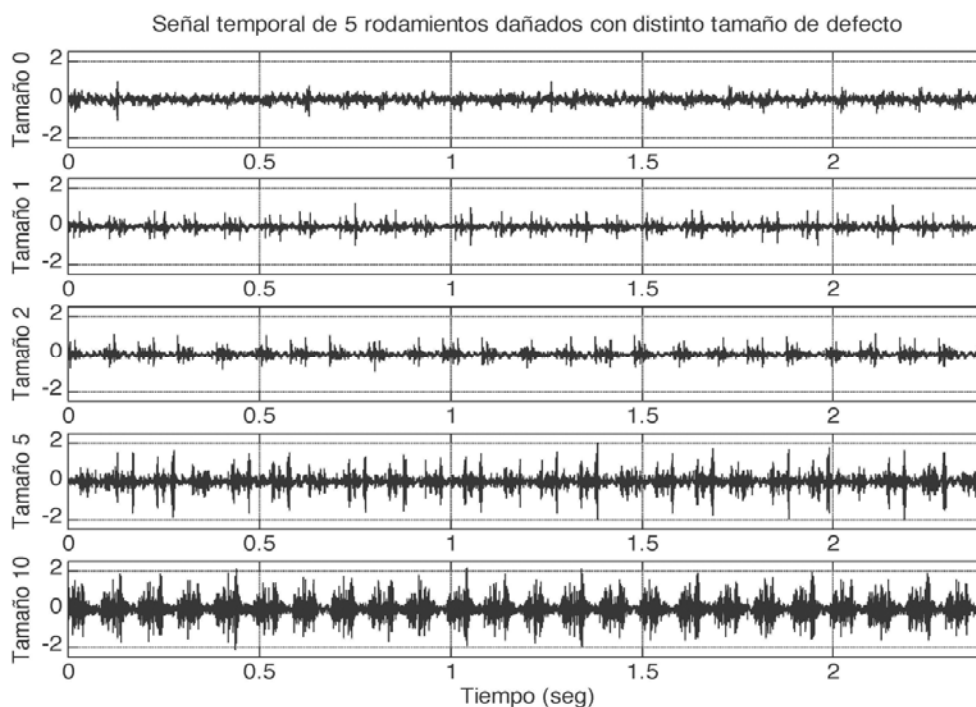


Figura 7.8.- Señales temporales correspondientes a 5 rodamientos con tamaños de defecto distinto.

Otra manera de extraer información es, por ejemplo, comparando las señales vibratorias emitidas por los rodamientos según los diferentes tamaños de defecto (figura 7.8), donde se aprecia como la amplitud de la señal de vibración aumenta a medida que se incrementa el tamaño del defecto.

## A2 Análisis de la señal temporal ampliada.

Esta técnica no es más que una variación de la técnica descrita anteriormente que consiste en ampliar determinadas zonas de la señal temporal para una observación más detallada.

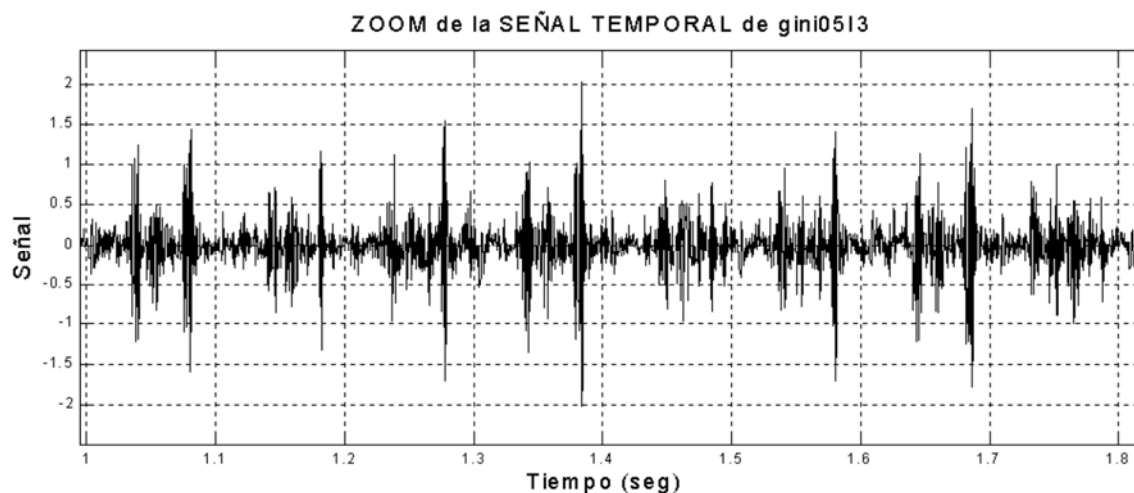


Figura 7.9.- Zoom de la señal temporal de vibración correspondiente a un registro del rodamiento Gini05i3.



### A3 Análisis de la envolvente de la señal temporal.

Este tipo de análisis es también semejante al análisis de la señal temporal con la salvedad que la señal de la envolvente es el resultado de aplicar el valor absoluto de la transformada de Hilbert de la señal temporal filtrada con un filtro elíptico de paso alto, optimizado para nuestro proceso.

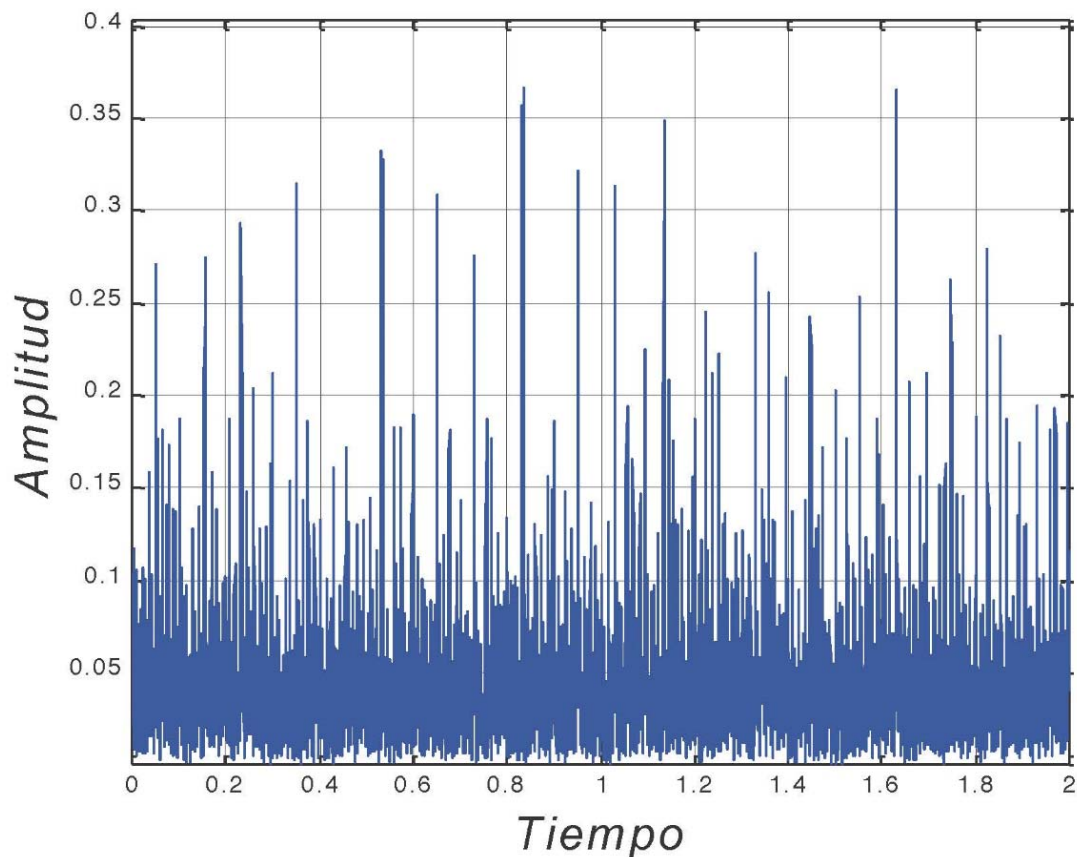


Figura 7.10.- Gráfica temporal del valor absoluto de la envolvente de un registro en el estado de carga r2a3.

En este tipo de análisis se aprecian los picos generados por el defecto, aunque es difícil apreciar la distribución de carga.

#### A4 Análisis de la envolvente de la señal de PeakVue.

Este tipo de análisis es similar a los dos anteriores pero, en este caso, la señal a analizar es la señal envolvente (calculada como en el punto anterior) de la señal de PeakVue.

El PeakVue es una abreviatura de “Peak-Value”, es decir, valor de pico. La técnica consiste en la consignación del valor máximo detectado en un intervalo de tiempo conocido. El intervalo de tiempo es escogido para que sea compatible con el ancho de banda seleccionado en el análisis de la señal de vibración.

Si se delimita el ancho de banda de un espectro de potencia para el PeakVue como  $F_{\max}$ , la frecuencia de muestreo de la señal inicial deber ser igual a  $2,56 \cdot F_{\max}$ .

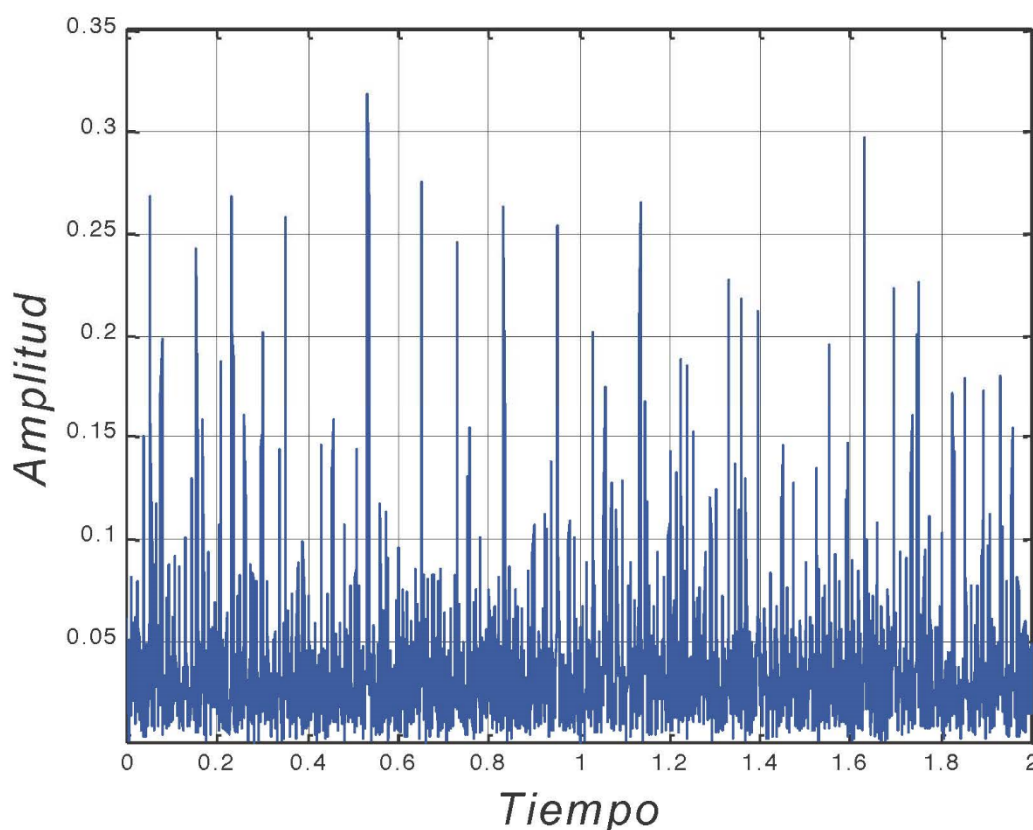


Figura 7.11.- Gráfica temporal del valor absoluto de la envolvente del PeakVue de un registro en el estado de carga r2a3.

La gráfica de este tipo de envolvente es similar a la obtenida en el apartado anterior, aunque el método basado en el PeakVue tiende a atenuar los picos de la envolvente.

Nuevamente, es difícil apreciar la distribución de carga.

### 3.2 TÉCNICAS EN EL DOMINIO DE LA AMPLITUD

#### B1 Análisis de la evolución de parámetros estadísticos.

Esta técnica se basa en la evolución de ciertos parámetros estadísticos con variación de las condiciones operativas de la máquina o del defecto. Es conocido, por ejemplo, que en cierta fase de los defectos localizados en rodamientos variables como el factor de cresta o la kurtosis evolucionan de una determinada forma para incrementos del fallo.

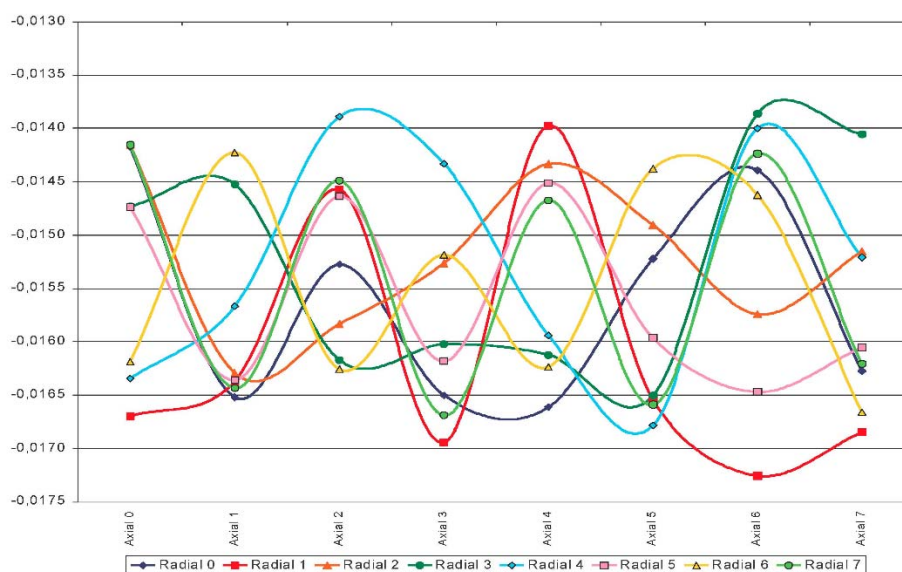


Figura 7.12.- Representación de la MEDIA: carga radial frente a carga axial.

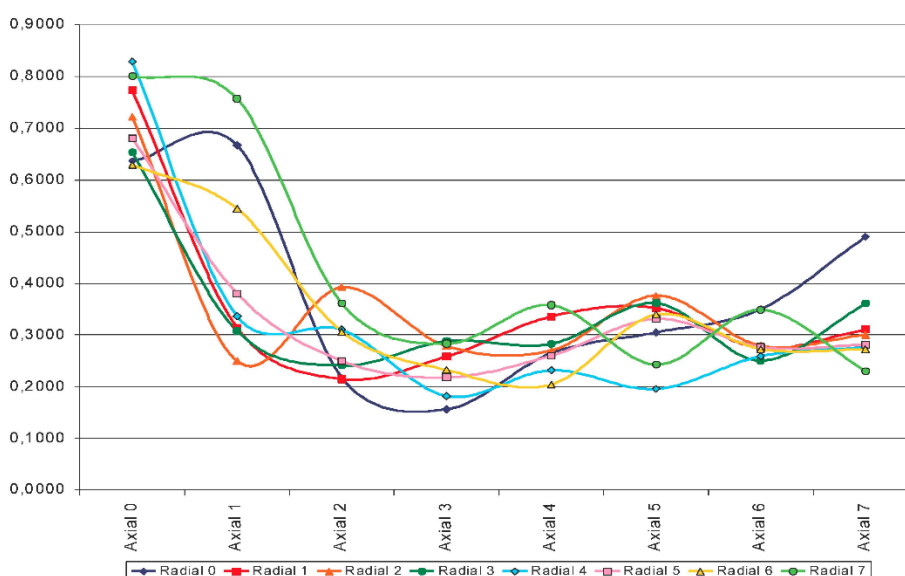


Figura 7.13.- Representación del VALOR MÁXIMO: carga radial frente a carga axial.

Aunque aquí sólo se presentan dos ejemplos (MEDIA y VALOR MÁXIMO), los parámetros estadísticos a los cuales se les hizo un seguimiento fueron: Media, Desviación típica, Valor máximo, Valor mínimo, Valor de pico, Valor eficaz, Valor medio, Valor pico a pico, Moda, Mediana, Sesgo, Kurtosis, Factor de forma, Factor de cresta.

Dentro de este análisis también se incluye el estudio del gráfico de la distribución de los puntos o histograma pues, de alguna manera, de él derivan el resto de variables estadísticas.

## **B2 Análisis de la evolución de la potencia espectral global.**

Esta técnica se basa en la variación de la potencia espectral global (es decir, abarcando todo el rango de frecuencias). Se entiende la potencia espectral total como la suma, en el espectro de potencia, de todos los valores de la PSD (densidad de potencia espectral) por el incremento de frecuencia o también como la mitad del valor cuadrático del valor eficaz ( $V_{RMS}$ ) de una señal temporal.

Esos valores se pueden determinar a partir del espectro de desplazamiento, de velocidad o de aceleración, donde las medidas en aceleración amplificarán las amplitudes de las componentes que aparecen a alta frecuencia (figura 7.14).

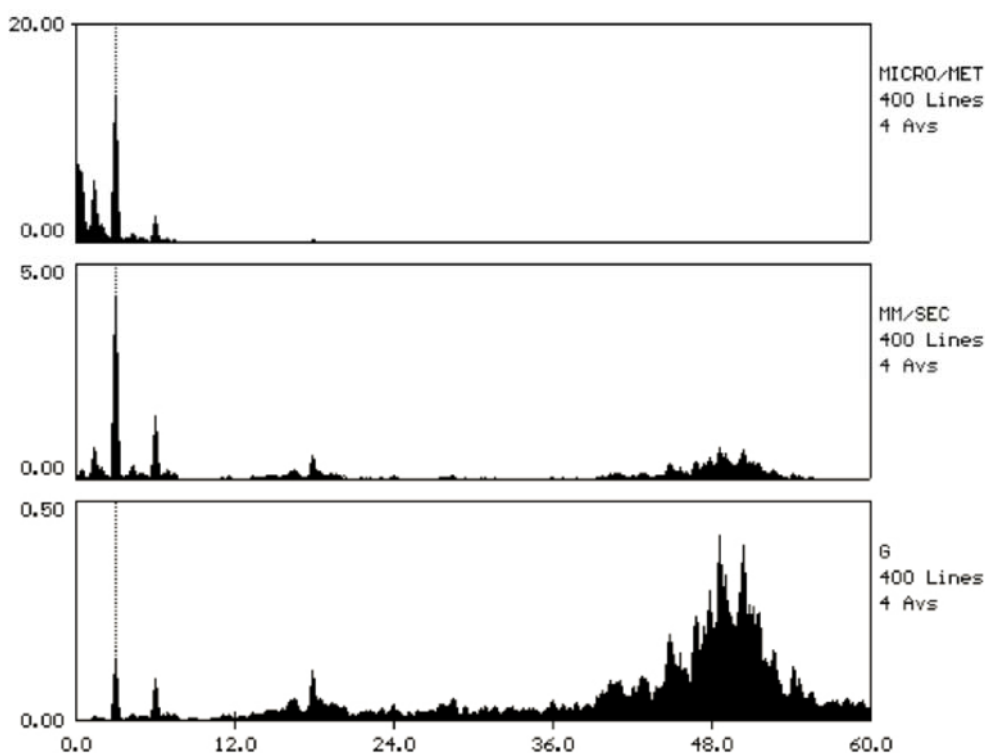


Figura 7.14.- Espectros de potencia de una medida en desplazamiento, velocidad y aceleración.

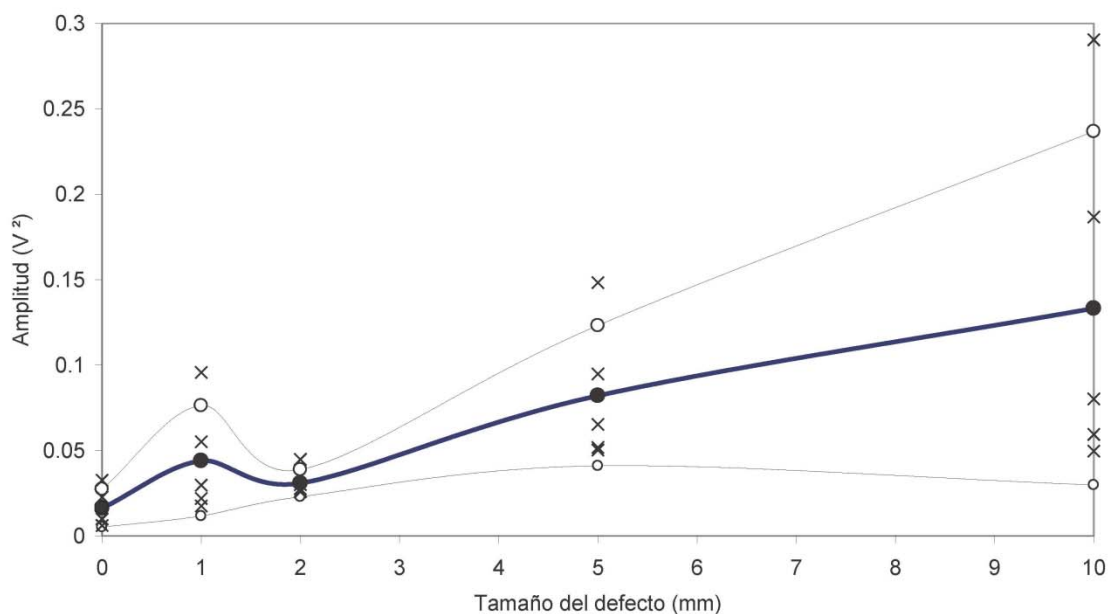


Figura 7.15.- Evolución de la potencia de la señal de vibración para los distintos tamaños de defecto.

En la figura 7.15 se muestran los valores de la potencia espectral de la señal vibratoria generada por los 25 rodamientos (cruces) para cada tamaño de defecto, así como el valor medio (puntos negros) y las desviaciones típicas (puntos blancos) de la potencia en cada tamaño de defecto. Se representa el valor medio de la potencia (punto negro), los valores individuales (cruces) y el intervalo de confianza de  $\pm$  la desviación típica.

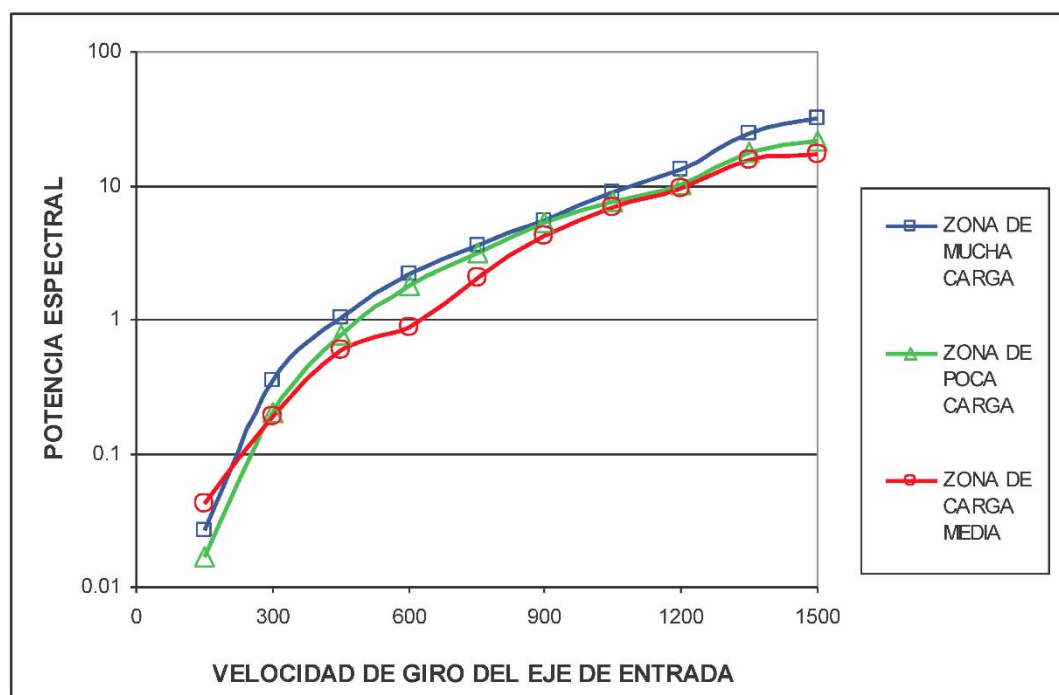


Figura 7.16.- Evolución de la potencia espectral de las vibraciones de rodamientos con defecto en anillo exterior situado en tres zonas con diferentes cargas y a varias velocidades del eje.

En la figura 7.16 encontramos otro ejemplo de gráfica de evolución de potencia espectral.

Es una de las formas más comunes de estimar como varía el defecto con el nivel de vibración.

### **B3      Análisis de la evolución de la potencia espectral a frecuencias selectivas.**

Esta técnica se basa en la variación de la potencia espectral del espectro de potencia (o del espectro de la envolvente) de unas pequeñas bandas de frecuencia. Estas bandas de frecuencia suelen ir asociadas a ciertas componentes; las estudiadas en la tesis son:

- En el espectro de potencia:
  - La componente aleatoria (alrededor de 0 Hz.).
  - Las componentes de los primeros armónicos de la frecuencia de giro, especialmente el primero y el segundo.
  - La frecuencia de engrane y sus armónicos sucesivos.
- En el espectro de la envolvente:
  - Las componentes de los primeros armónicos de la frecuencia de giro, especialmente el primero y el segundo.
  - Las componentes de los primeros armónicos de las frecuencias de defecto en los rodamientos.

Algunas veces, el análisis de la evolución de la potencia espectral a frecuencias selectivas, estos valores eran normalizados respecto a la potencia espectral total.

### **B4      Análisis de la evolución del Spike-Energy total.**

Esta técnica fue descartada tras varias pruebas porque sus resultados fueron similares a los de la evolución de la potencia espectral global.

### 3.3 TÉCNICAS GRÁFICAS

#### C1 Análisis del espectro de potencia.

Básicamente consiste en extraer el valor cuadrático del valor eficaz (figura 7.17) o del valor cuadrático de la amplitud de la FFT (calculando la PSD o  $S(f)$ ) aplicada a una señal temporal  $x(t)$ , correspondiente a la señal vibratoria a estudiar:

$$S(f) = \frac{\Delta T}{N} \cdot |X(k)|^2 = \frac{\Delta T}{N} \cdot X(k) \cdot X^*(k)$$

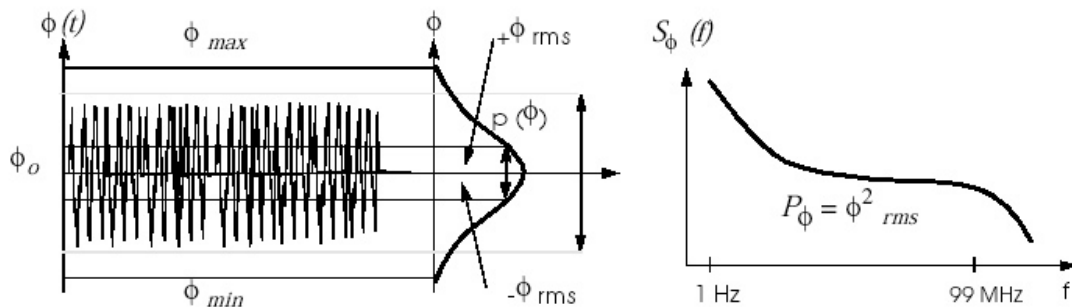


Figura 7.17.- Interpretación del espectro de potencia como valor cuadrático del valor eficaz.

Este espectro recibe el nombre de “espectro de potencia” y la frecuencia  $f$  abarca desde cero hasta la frecuencia máxima. En el espectro irán apareciendo picos de diferentes amplitudes, en cada una de las frecuencias del margen escogido, que se relacionarán con las frecuencias de algunos componentes del sistema y de otras relacionadas con defectos (frecuencias de resonancia de los elementos, de la estructura, por holguras, etc.). Algunas veces, el espectro de potencia es normalizado respecto a la potencia espectral total.

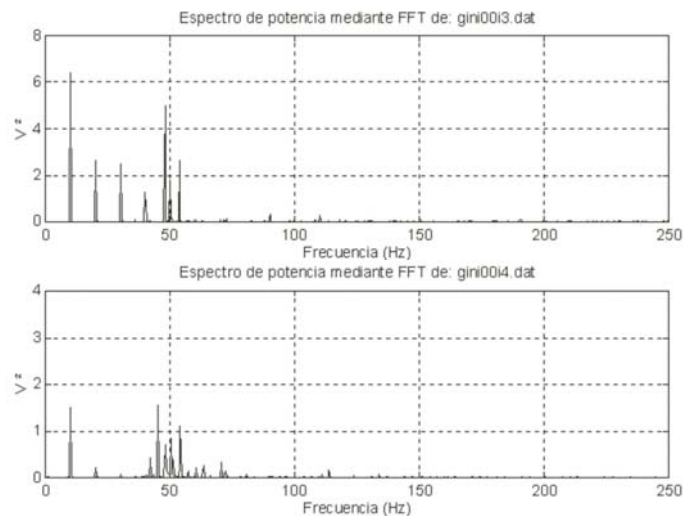
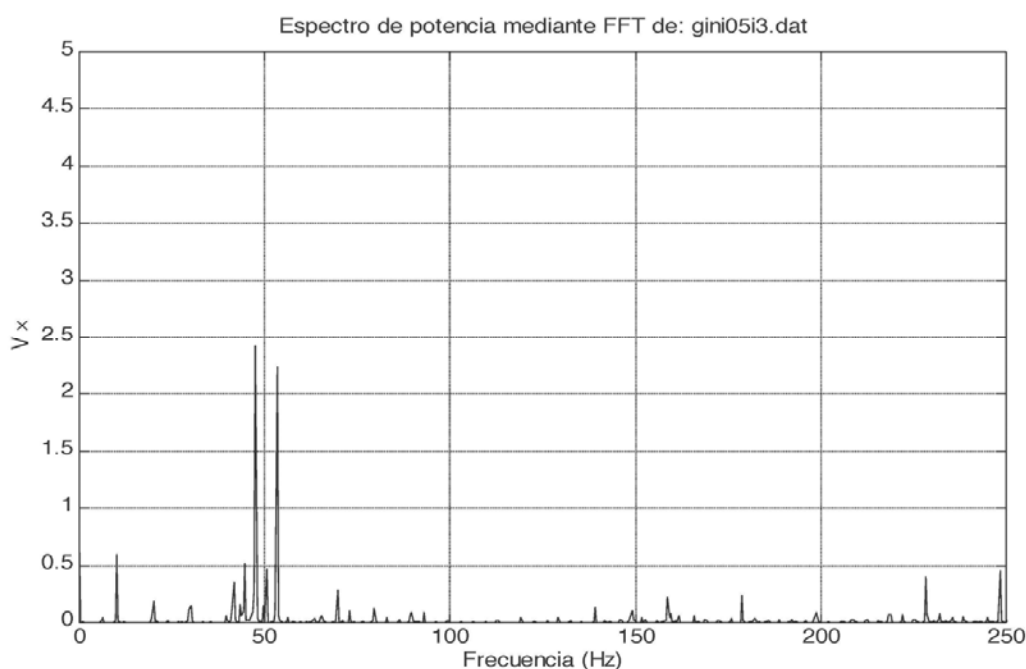


Figura 7.18.- Ejemplos de espectro de potencia de rodamientos sin defecto.





**Figura 7.19.- Ejemplo de espectros de potencia mediante la FFT (PSD).**

La figura 7.19 es perfectamente representativa del resto de espectros de potencia donde sólo se muestran algunos picos significativos: a la frecuencia de red, frecuencias de resonancia de la bancada y otros que denotan la existencia de desalineamiento o desequilibrio en el eje (armónicos de la frecuencia de giro).

## **C2 Análisis del mapa de espectros de potencia.**

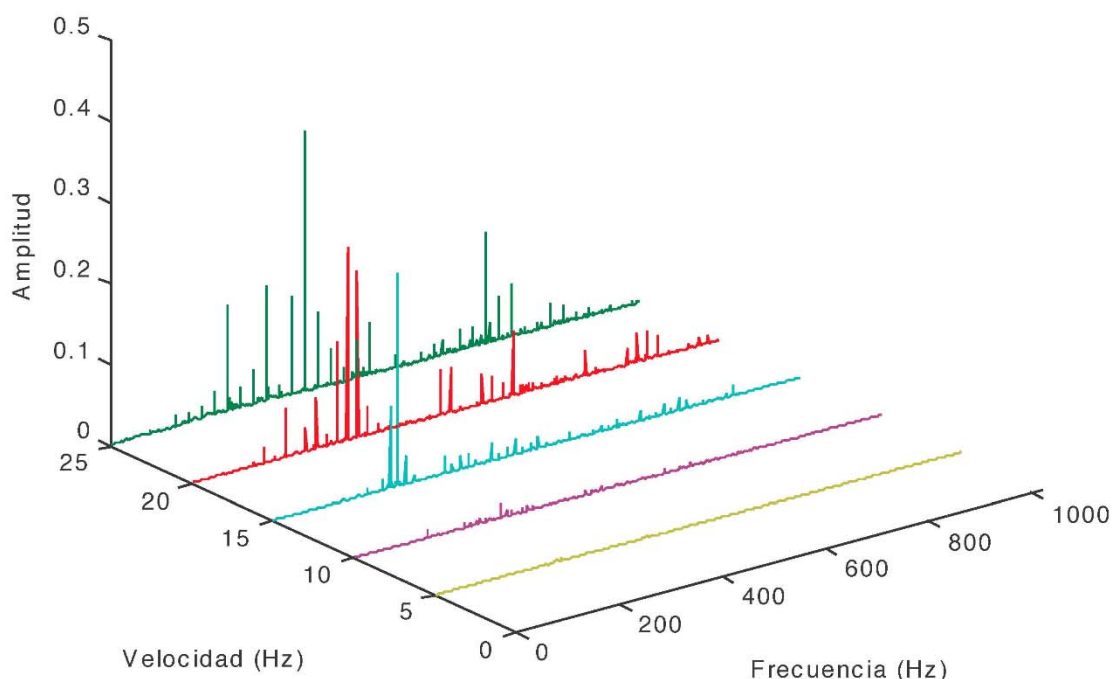
Consiste la realización de mapas con la sucesión de los espectros de potencia (espectros en cascada) en función de la velocidad de la máquina o del estado de desarrollo del defecto.

Los mapas de espectros de potencia son representaciones tridimensionales donde se reproducen: las amplitudes de las PSD (eje z), la frecuencia (eje x) y las velocidades de giro del eje de entrada (eje y).

En un mismo gráfico se pueden ver, para un determinado estado de defecto, los espectros de potencia a todas las velocidades de giro medidas.

Con esta visualización tridimensional de los espectros se puede observar la evolución, a lo largo de la velocidad, de los principales picos del espectro de potencia y poder comparar los espectros de potencia a las distintas velocidades para los distintos estados de desalineamiento.

Representacion Tridimensional de PSD en el ESTADO 1 para todas las velocidades



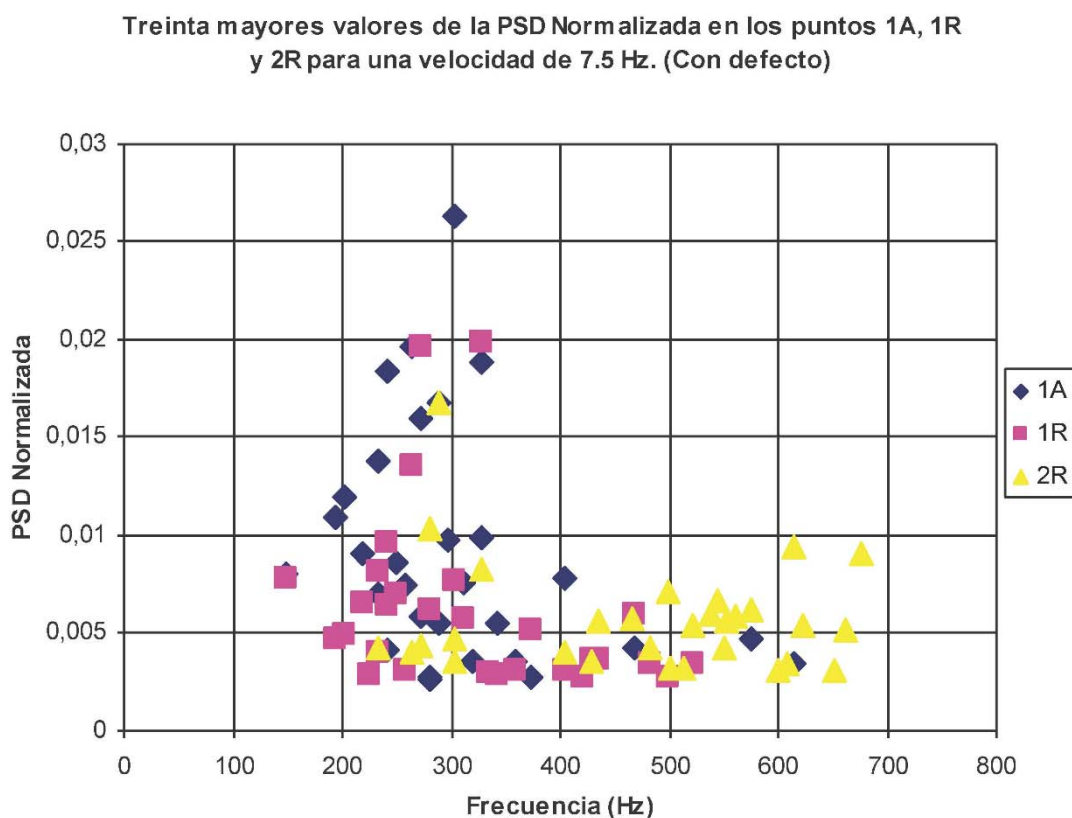
**Figura 7.20.- Mapa de espectros de potencia de la señal vibratoria de la reductora, en sentido radial, Estado 1.**

En el gráfico representado en la figura 7.20 se puede observar claramente la evolución de los picos de GMF y 2 x GMF, con sus respectivas bandas laterales, a lo largo de las distintas velocidades.

La evolución de la frecuencia de los picos de GMF y 2 x GMF en todas las gráficas no presentan ninguna anomalía.

### C3 Análisis de los picos mayores de los espectros de potencia.

Consiste en la reproducción, en un espectro, de los 30 mayores picos de tres espectros de potencia normalizados resultantes de la PSD de una señal temporal tomada en tres puntos de medida diferentes, en un mismo instante.



**Figura 7.21.- Representación conjunta de los 30 mayores valores de PSD normalizada en los puntos 1A, 1R y 2R para una velocidad de 7,5Hz (con defecto).**

### C4 Análisis de los picos acumulados en bandas de frecuencia del espectro de potencia a varias velocidades.

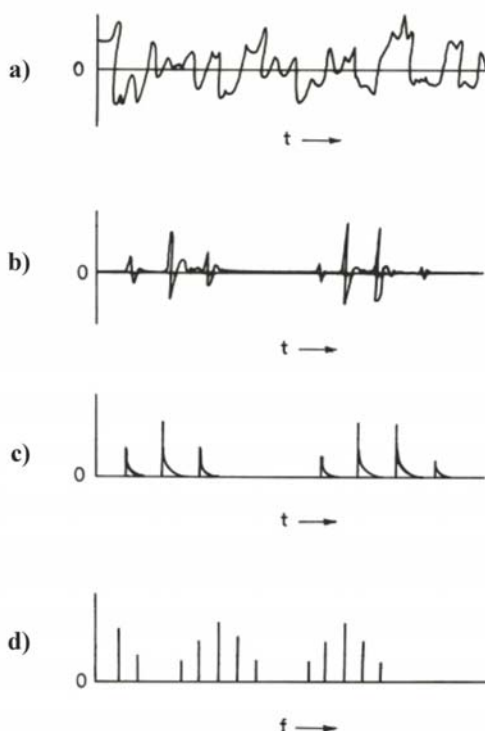
Consiste en la reproducción, en un espectro, de los 300 mayores picos en bandas de 16 Hz, resultados de calcular los 30 mayores picos de diez espectros de potencia normalizados, en un mismo punto, para diez velocidades diferentes.

**C5 Análisis del espectro de potencia de la envolvente.**

Este tipo de análisis es semejante al análisis de la señal temporal con la salvedad que la señal de la envolvente es el resultado de aplicar el valor absoluto de la transformada de Hilbert de la señal temporal filtrada con un filtro elíptico de paso alto, optimizado para nuestro proceso.

Nosotros adaptaremos esta técnica y crearemos una particularización de la misma, siguiendo el siguiente proceso:

1. Se aplicará sobre la señal temporal (figura 7.22-a) un filtro elíptico de paso alto, suprimiendo o atenuando fuertemente las componentes de baja frecuencia (figura 7.22-b) para así aislar las zonas resonantes de alta frecuencia.
2. A continuación se rectificará la señal anterior (eliminando la componente continua) y mediante un detector de envolvente se extrae la señal moduladora (figura 7.22-c). Esta transformación la logramos aplicando el valor absoluto de la transformada de Hilbert, suprimiendo el filtro de paso bajo que se suele utilizar con esta técnica.
3. Finalmente, una vez obtenida la envolvente de la señal temporal (ya rectificada y alisada en caso necesario) se obtiene su espectro de potencia (figura 7.22-d).



**Figura 7.22.- Proceso aplicado para determinar el espectro de potencia de la envolvente.**

Este método de análisis es uno de los más utilizados para los procesos en los cuales se hace necesaria la demodulación de la señal de vibración. Por esto, teniendo en cuenta sus propiedades y las características ya vistas de nuestra señal el análisis de la envolvente debería proporcionar datos concluyentes.

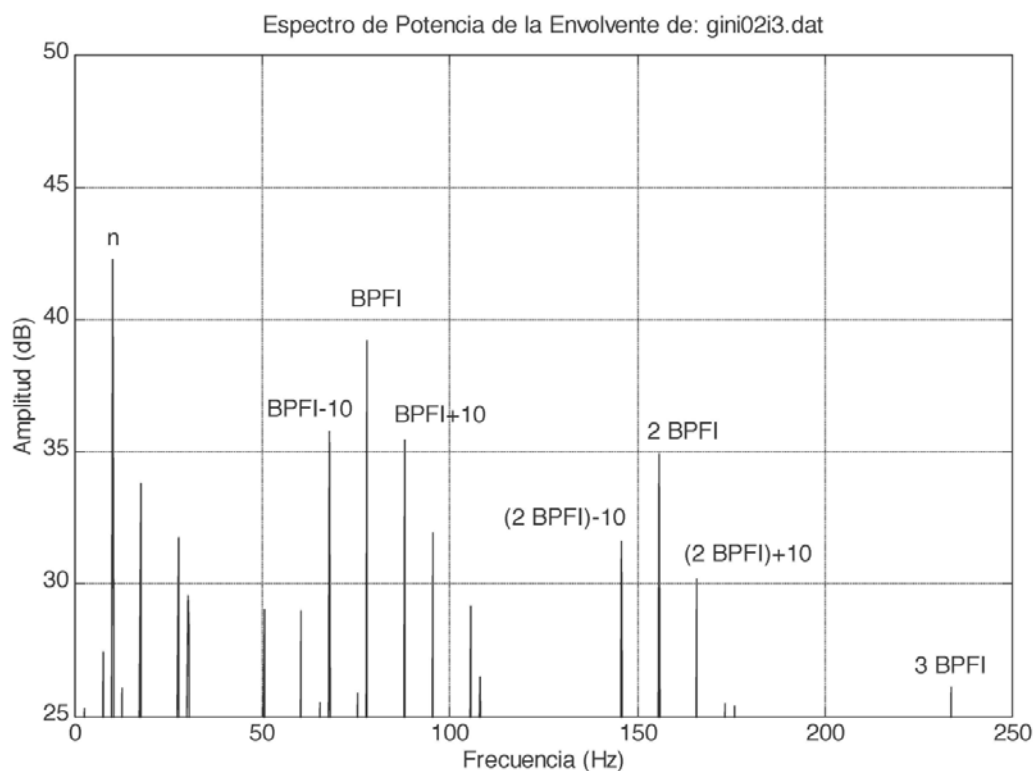


Figura 7.23.- Ejemplo de espectro de la envolvente de la señal de vibración de un rodamiento dañado (gini02i3).

Observando la gráfica y las frecuencias de fallo que aparecen, ya se puede deducir perfectamente el tipo de defecto que tiene el rodamiento.

Es uno de los métodos más usados.

#### C6 Análisis del espectro de potencia del PeakVue.

El proceso seguido es el mismo que el seguido en el análisis del espectro de potencia de la envolvente, con la salvedad que la señal vibratoria de partida no es la original sino la determinada según el valor de pico, como se explicó en la técnica A-4.

### C7 Análisis del Cepstrum.

El esquema seguido en la técnica de análisis del cepstrum es el de la figura 7.24; es decir, a la señal temporal de vibración se le aplica la transformada de Fourier, a esta señal se le aplica el logaritmo y a la resultante se le aplica la transformada inversa de Fourier y se representa en función del tiempo.

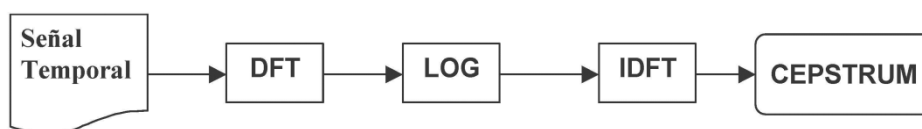


Figura 7.24.- Proceso seguido por la técnica de análisis mediante Cepstrum.

Para determinar el cepstrum complejo, en la etapa central, se realiza el logaritmo directamente a la señal resultado de aplicar la transformada de Fourier de la señal temporal, mientras que en el cepstrum real lo que se realiza es el logaritmo de la magnitud (valor absoluto de la señal tras aplicar la transformada de Fourier).

Es especialmente importante controlar las señales en tiempos bajos, menores que 0.1 seg. (frecuencias superiores a 10 Hz), que es donde se encuentran todos los picos susceptibles de aparecer como indicadores de un síntoma.

El resultado de aplicar el análisis Cepstrum a la señal de vibración generada por los rodamientos, fueron unas gráficas en las cuales, en algunos casos, aparecen reflejados los picos correspondientes a la frecuencia de defecto, sus bandas laterales y una gran variedad de armónicos (como se aprecia en la figura 7.25).

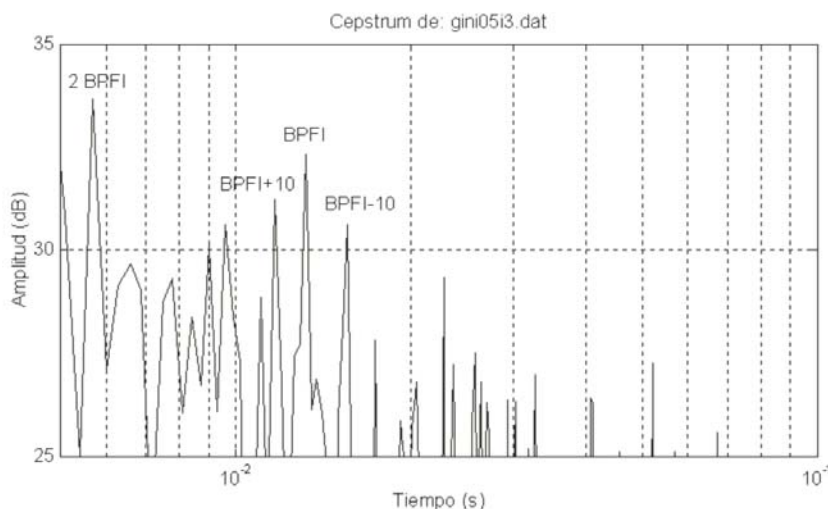


Figura 7.25.- Ejemplo de Cepstrum de la señal de vibración de un rodamiento dañado.

No obstante, esto acontece de una forma irregular y mucho menos clara que en el análisis anterior, dado que la relación de amplitudes entre los picos principales y los no tan importantes (armónicos, bandas laterales...) es mucho menor y ya que aparecen muchos más picos y muy juntos, no resulta tan sencilla la identificación del defecto.

Es decir, esta técnica podría ser aplicada para la detección del defecto pues en el gráfico, aunque irregularmente, aparece el pico que denota el mismo, pero no podría utilizarse para seguir su evolución pues estos picos no muestran tendencias claras.

Dado que el análisis cepstrum nos ofrece unos resultados en una escala temporal, se debe conocer el equivalente, en el dominio temporal, de las frecuencias características de cada tipo de defecto.

### **C8 Análisis de diagramas tiempo-frecuencia planos.**

Esta técnica de análisis tempo-frecuencial consiste en una representación compuesta de tres gráficos:

- En horizontal, la representación temporal de uno o más giros del eje donde se aloja el rodamiento.
- En vertical, la representación de las frecuencias bajas del espectro de la envolvente pero que contengan, al menos, hasta el tercer armónico de la frecuencia de defecto.
- Bordeando los otros dos gráficos, el diagrama bidimensional de los coeficientes de la CWT (Continuous Wavelet Transform):

$$\text{CWT}(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int s(t) \cdot \psi\left(\frac{t - \tau}{a}\right) \cdot dt$$

En este caso, la wavelet madre  $\psi$  será del tipo Daubechies (figura 7.26) o su variante Symlet (figura 7.27) y la escala la determinará la señal de amplitud del espectro de la envolvente.



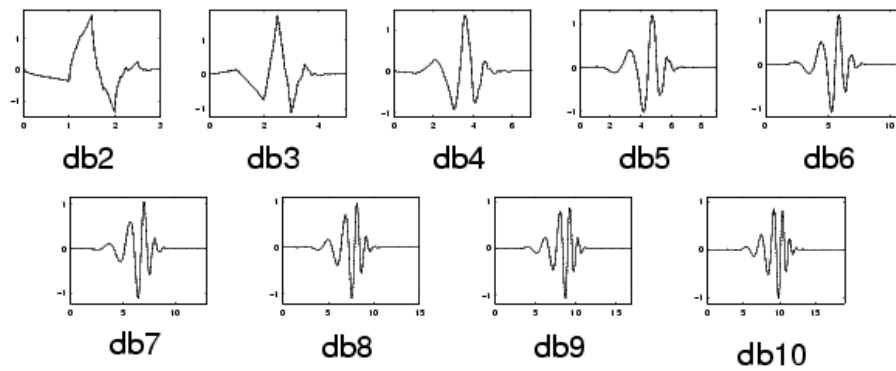


Figura 7.26.- Curvas wavelet de la familia Daubechies.

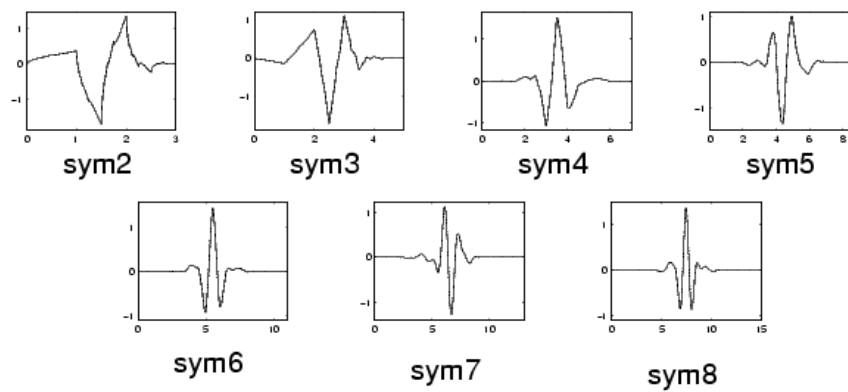


Figura 7.27.- Curvas wavelet de la familia Symlet.

La representación tempo-frecuencial que obtendríamos sería similar a la figura 7.28.

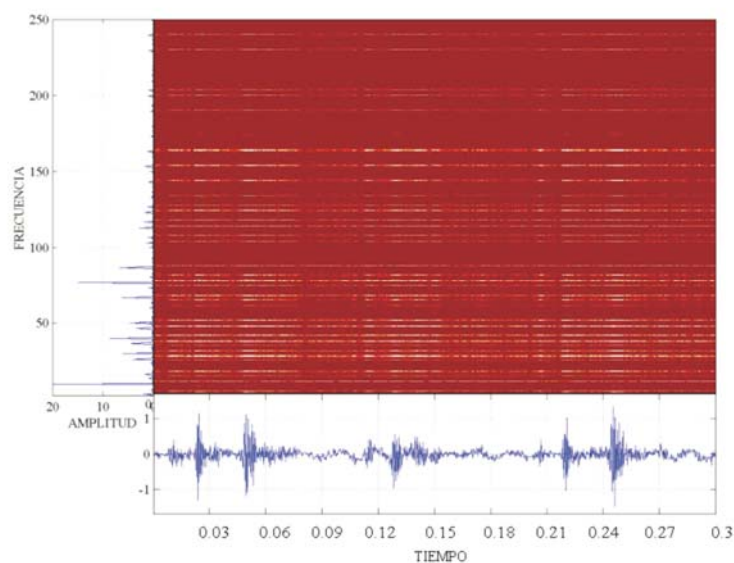


Figura 7.28.- Diagrama tiempo-frecuencia plano (variante para el espectro de la envolvente) del rodamiento gini05i1.

Los impulsos se traducen al mapa wavelet en 2D como zonas claras en las líneas horizontales que muestran los picos de frecuencia, mientras que las zonas más oscuras indican zonas temporales sin choque.

Según sea la energía del impulso el color de la zona evoluciona de blanco a amarillo, naranja y a rojo cuando la energía es muy elevada.

### C9 Análisis de diagramas tiempo-frecuencia tridimensionales.

Esta técnica es una variedad de la técnica previa donde lo que se representa es el diagrama tridimensional de los coeficientes de la CWT, mencionados anteriormente.

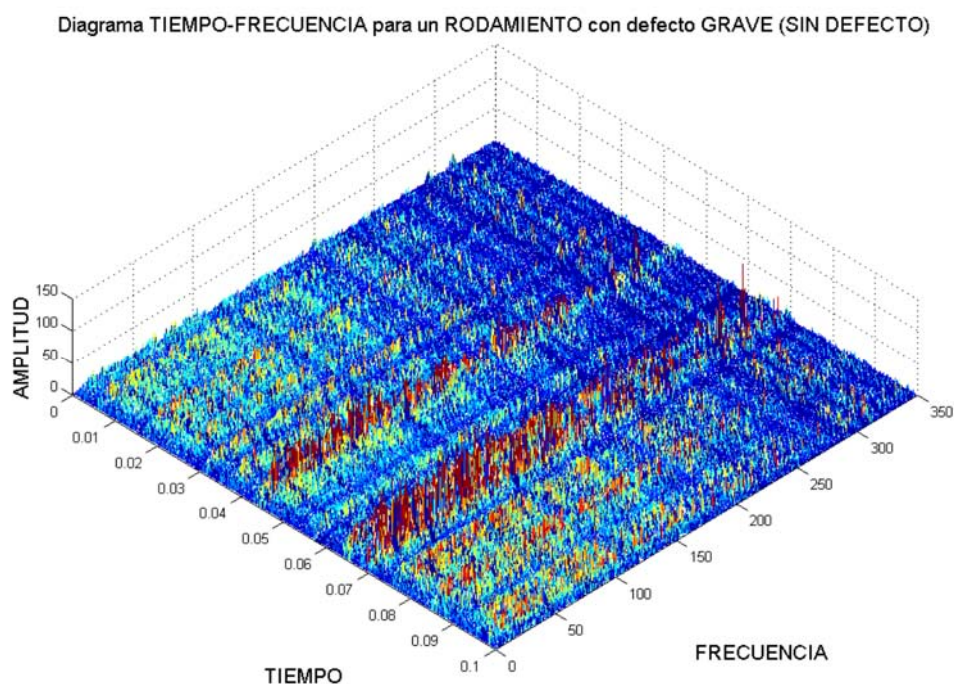


Figura 7.29.- Diagrama tiempo-frecuencia para rodamientos sin defecto, a una velocidad del eje de 1200 rpm.

#### 4. CONCLUSIONES

El objetivo principal de esta investigación fue *el estudio de las características y la evolución de la señal vibratoria generada por un rodamiento con un fallo localizado y de tamaño progresivo, extendiendo el estudio, principalmente, al caso del defecto en la pista de rodadura del anillo interior de un rodamiento de contacto angular.*

**De la completa revisión bibliográfica efectuada**, se ha obtenido un catalogo actualizado de tratamiento, caracterización y modelado de la señal vibratoria generada por el defecto local en el rodamiento. La aplicación de dichas técnicas nos ha permitido clasificar y seleccionar aquellas de mayor rendimiento para los fines propuestos:

##### Técnicas en el dominio de la amplitud.

B2 Análisis de la evolución de la potencia espectral global.

B3 Análisis de la evolución de la potencia espectral a frecuencias selectivas.

##### Técnicas gráficas.

C5 Análisis del espectro de potencia de la envolvente.

La técnica C5 se demostró la más eficaz para identificar los defectos en rodamientos, mientras que las técnicas B2 y B3 permitían cuantificar el tamaño del mismo. Las técnicas han sido mejoradas y particularizadas para los defectos estudiados.

**Se ha obtenido la correlación entre** la potencia espectral total y la progresión del defecto. Del estudio de dicha correlación se obtienen una curva diferente para cada máquina: banco de ensayo de rodamientos y reductora industrial.

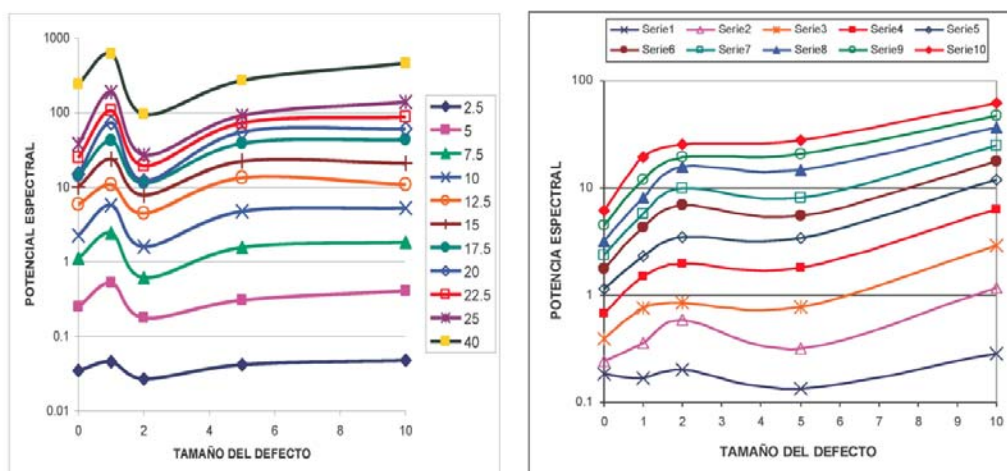


Figura 7.30.- Evolución de la potencia espectral de la señal emitida por los rodamientos con defectos de diferentes tamaños, en el banco de rodamientos y en la reductora industrial, a varias velocidades del eje.

En todos los casos, la curva presenta una singularidad en su crecimiento en el entorno de defecto [2,5] y a partir de esa zona evoluciona con un crecimiento neto. Dicha zona de transición, en el nivel de defecto, nos señala la consolidación del defecto.

## **5. OTRAS APORTACIONES**

**Se ha caracterizado la señal de vibración** generada por los defectos localizados en rodamientos mediante un modelo analítico y su implementación informática, en código MATLAB, que consideraba las siguientes variables:

- Geometría del defecto.
- Cinemática de los pares elementales involucrados.
- Distribución y magnitud de la carga de los elementos rodantes con la pista de rodadura.
- Características elásticas del contacto (frecuencia natural y coeficiente de amortiguamiento).
- El tipo y tamaño de defecto.

La señal periódica para un defecto único "i" vendría dada por la ecuación:

$$x_i(t) = \sum_j g_i(t - j \cdot T_i) \cdot U(t - j \cdot T_i)$$

**j** Índice del período.

**T<sub>i</sub>** Período de repetición, inverso de la frecuencia de defecto.

**U** Función escalón unitario

**g<sub>i</sub>(t)** Respuesta vibratoria del sistema después del impacto con el defecto.

En dicha respuesta se asume como la interacción de dos sinusoides amortiguadas, para cada modo estructural, donde " $\alpha$ " y " $\omega_D$ " dependen del modo "n" ( n = 1, 2, 3, ...).

$$g_i(t) = A_i \cdot e^{-\alpha \cdot t} \cdot \text{sen}(\omega_D \cdot t)$$

Para completar el modelo matemático de vibración para defectos localizados, se considera el efecto de la carga sobre el rodamiento.

Así la curva de distribución de la carga en la pista de rodadura interior del rodamiento estará dada por la ecuación:

$$Q_{\psi} = Q_{\max} \cdot \left( 1 - \frac{1}{2 \cdot \varepsilon} \cdot (1 - \cos \psi) \right)^n$$

$\psi$  Ángulo respecto al punto de máxima carga.

$\psi_{\max}$  Semiángulo de la zona de carga.

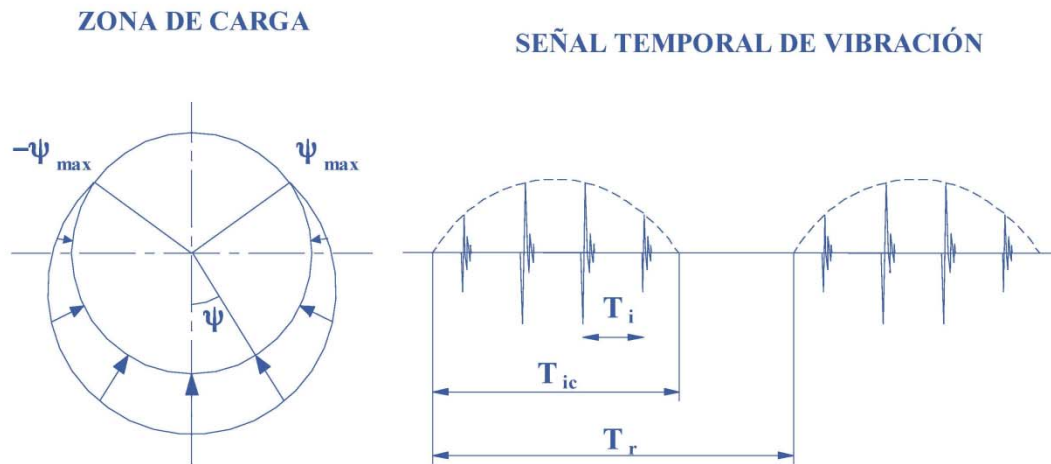
$Q_{\max}$  Carga aplicada en el punto de máxima carga.

$Q_{\psi}$  Carga aplicada en el punto correspondiente al ángulo  $\psi$ .

$n$  Coeficiente dependiente del tipo de elemento rodante (para bolas  $n = 3/2$  y para rodillos  $n = 1,1$ ).

$\varepsilon$  Factor de distribución de la carga (se han despreciado las variaciones de carga en función del número de elementos rodantes en la zona de carga).

Esta ecuación indicará la carga que soporta un elemento rodante según la posición instantánea que ocupa en la zona de carga (figura 7.31).



**Figura 7.31.- Influencia de la zona de carga en la señal de vibración emitida por u rodamiento con fallo puntual localizado en su pista interior.**

La distribución de carga gira con  $\psi$  que es función del tiempo. Para el caso de rotación del anillo interior del rodamiento,  $\psi = 2 \cdot \pi \cdot f_{ir} \cdot t$ , (siendo  $f_{ir} = 1/T_r$ ) mientras permanezca en la zona de carga ( $\psi_{\max}$ ), resultando así una función de carga periódica dependiente del tiempo ( $Q(t)$ ) del mismo periodo que  $x_i(t)$ . El resultado de lo expuesto es que el valor de  $g_i(t)$  pasa a ser  $g'_i(t)$ .

$$g'_i(t) = \begin{cases} g_i(t) \cdot Q_{\max} \cdot \left( 1 - \frac{1}{2 \cdot \varepsilon} \cdot (1 - \cos \psi) \right)^n & ; \text{ para } \frac{t}{T} \leq \psi_{\max} \\ 0 & ; \text{ para } \frac{t}{T} > \psi_{\max} \end{cases}$$

$$x_i(t) = \sum_j g'_i(t - j \cdot T_i) \cdot U(t - j \cdot T_i)$$

Siendo estas ecuaciones las implementadas en código MATLAB, que nos caracteriza la señal de vibración generada por el defecto localizado en un rodamiento.

A pesar del carácter impulsivo y aleatorio de la señal de vibración obtenida en ensayos, de gran complejidad y de difícil caracterización, este modelo nos ha permitido simular una señal vibratoria cuya respuesta es de características similares a las registradas en los ensayos y establecer la distribución real de carga en el rodamiento.

**En el desarrollo de trabajos** experimentales donde se realizan series de ensayos y debido a la dificultad y coste de los mismos, es conveniente el uso de herramientas de simulación por ordenador que nos permitan mediante el uso de modelos simplificados resultados suficientemente exactos, de este modo se minimizan el número de ensayos en el laboratorio. Para ello, se ha utilizado el código ALGOR: cálculo cinemático, dinámico y estructural. De la utilización de dichas simulaciones, parametrizadas en función de: nivel de carga, velocidad de funcionamiento, y tipo, forma y tamaño del defecto, nos ha permitido obtener la evolución de la potencia espectral total ante incrementos del tamaño del defecto (figura 7.32), logrando un gran nivel de correlación con la obtenida en los ensayos con los modelos industriales: banco de rodamientos y reductora industrial.

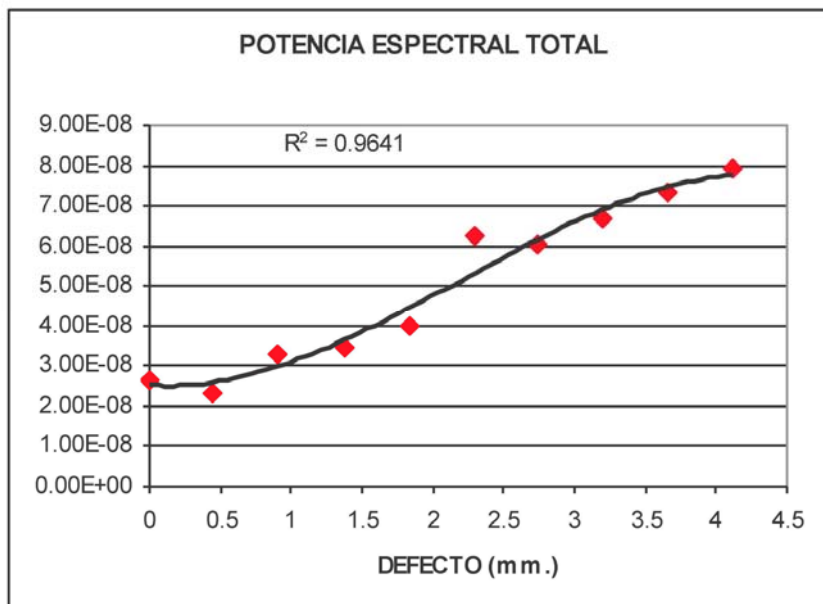


Figura 7.32.- Evolución de la potencia espectral de las vibraciones emitidas por un rodamiento con defecto de diferentes tamaños, en el modelo implementado en código ALGOR.

**Por último, se debe destacar que el estudio realizado,** tomando como referencia modelos de defecto en rodamientos ideales y modelos en banco de ensayos de rodamientos, se ha aplicado a un sistema mecánico complejo: reductora industrial.



## **6. FUTUROS DESARROLLOS**

En el modelo analítico, implementado en MATLAB, incorporar otros defectos, así como la interacción de varios de ellos.

Intentar avanzar hacia modelos de simulación tridimensionales y combinados con otros elementos mecánicos.

Generalizar las conclusiones obtenidas en el caso de reductora industrial a otros tipos de máquinas.

Investigar nuevas técnicas de análisis, tanto en el dominio temporal, frecuencial y temporal-frecuencial (wavelets).







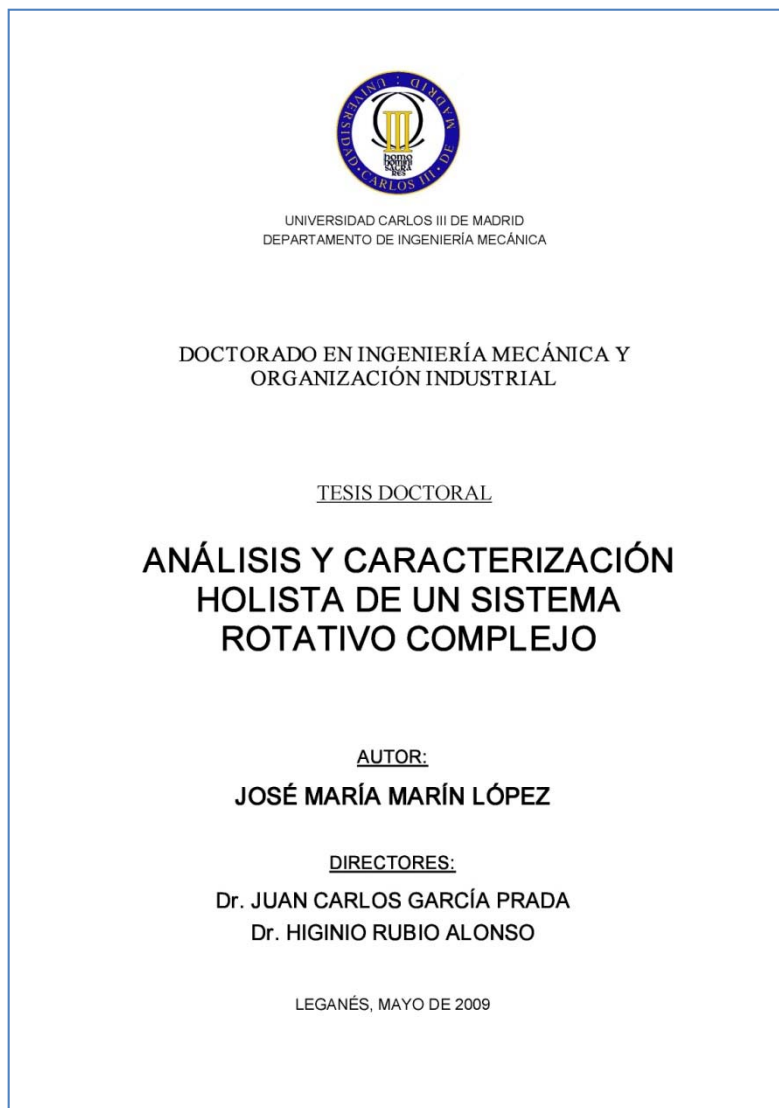
## **TEMA 8 :**

**TESIS DOCTORAL DE JOSÉ MARÍA MARÍN  
LÓPEZ**





Otra tesis doctoral con la que vamos a trabajar pertenece a José María Marín López. El título de la misma es: “Análisis y caracterización holista de un sistema rotativo complejo”.



Está fechada en Mayo 2009.

## **1. CONDICIONES DE MEDICIÓN Y RODAMIENTOS UTILIZADOS**

### RODAMIENTOS

Para realizar los ensayos experimentales se emplean rodamientos rígidos de bolas SKF 6206. Estos rodamientos están compuestos por los anillos interno y externo, 9 bolas y una jaula de poliamida.

### DEFECTOS

Se cuenta con 60 rodamientos debidamente identificados de tal forma que formen seis grupos de 10 rodamientos con las siguientes características:

- Rodamientos de 9 bolas en perfecto estado (sin defecto)
- Rodamientos de 3 bolas en perfecto estado (sin defecto)
- Rodamientos de 9 bolas con defecto en anillo externo
- Rodamientos de 3 bolas con defecto en anillo externo
- Rodamientos de 9 bolas con defecto en anillo interno
- Rodamientos de 3 bolas con defecto en anillo interno

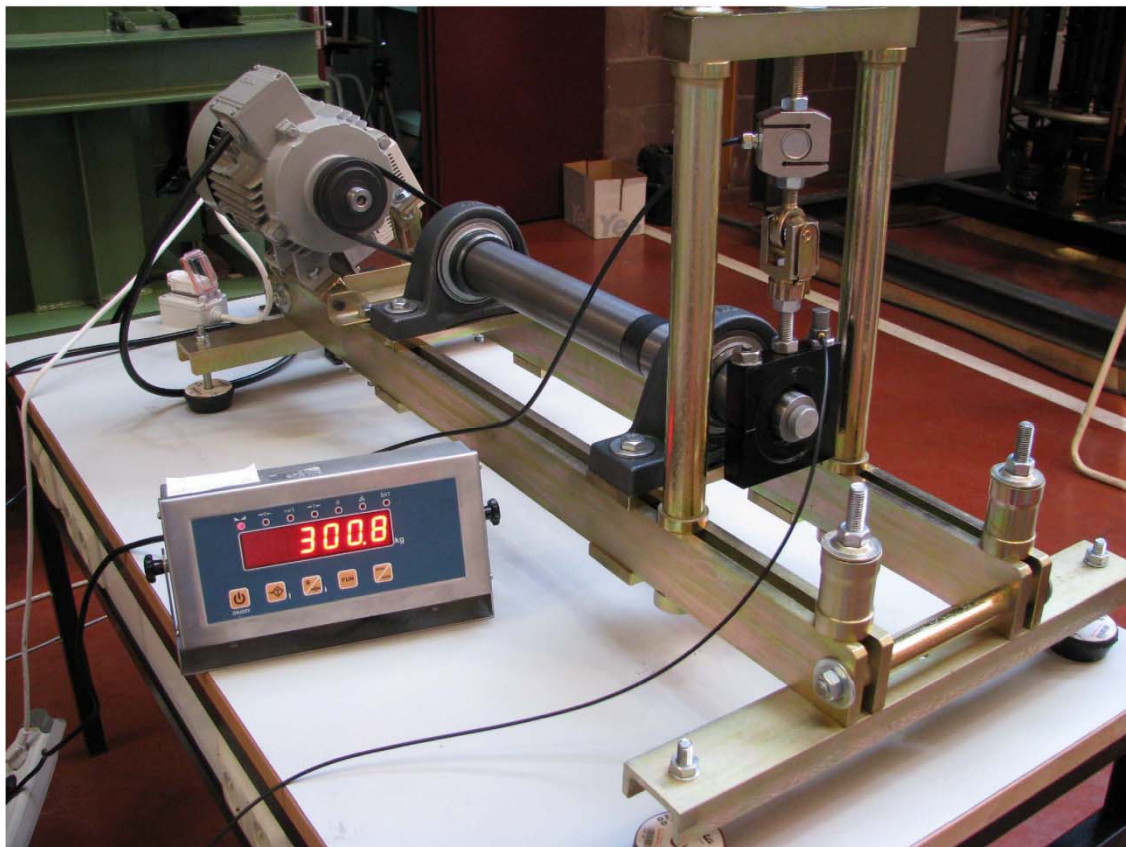
No se han tenido en cuenta los rodamientos con defectos en los elementos rodantes por la dificultad de poder modelar el funcionamiento de dichos elementos

El defecto que se va a realizar sobre los rodamientos es una ranura de 1 mm de anchura a lo largo de todo el arco axial de la pista por 0,25 mm de profundidad dispuesta sobre el anillo correspondiente (externo o interno) paralela al eje del rodamiento, y es igual para todos los rodamientos defectuosos. El defecto se genera operando con un botador sobre el rodamiento erosionando la superficie comprendida entre las dos marcas que denotan el tamaño de defecto pero haciendo una presión media con el botador.

Con el fin de conseguir uniformidad se produjeron todos los defectos en una sesión, intentando mantener el mismo nivel de imperfección.

## BANCO DE ENSAYOS

El banco de ensayos se diseñó como una estructura sencilla, con una rigidez aceptable, pero que nos permita realizar los ensayos de la manera más precisa posible, y nos dé la posibilidad de reproducir diversas características de trabajo fácilmente.



**Figura 8.1.- Banco de ensayos usado para las señales experimentales.**

El banco de ensayos dispone de un motor trifásico para accionar el eje sobre el que se sitúa el rodamiento a estudiar. Es un motor trifásico comercial Siemens de 1,5 kW, rotor en cortocircuito, de 4 polos y 50Hz con una velocidad nominal de 1420 rpm., cuya velocidad es regulada variando la frecuencia de giro. El par nominal es de 5,23 Nm.

Además, poseemos un variador de velocidad TOSHIBA para el control de velocidad del rotor, un tacómetro para el control de la velocidad, y células de carga con visor.

Por tanto, en el banco de ensayos se pueden variar: la velocidad de rotación del anillo interno (activando un mando giratorio del variador de velocidad) o fijándole la velocidad, la carga que actúa sobre el rodamiento (actuando sobre los husillos que soportan las células de carga).

Es especialmente interesante reseñar la brida o alojamiento, que se ha diseñado para poder cambiar el rodamiento sin grandes esfuerzos ni utilizar herramientas especiales. Se ha tenido en cuenta que las frecuencias propias de vibración no se encuentren próximas a las frecuencias esperadas de defecto de los rodamientos

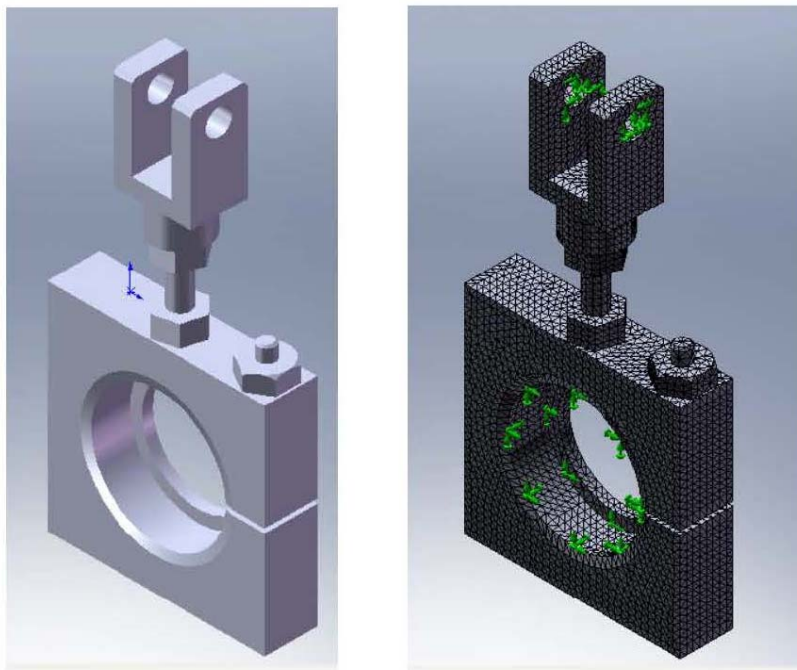


Figura 8.2.- Brida o alojamiento del rodamiento.

Los ensayos se van a realizar con carga variable de 100 Newton hasta 3000 Newton, y velocidad variable desde 300 rpm (5Hz) hasta 3000 rpm (50 Hz) como se detalla en la siguiente tabla:

Carga <i>Newton</i>	Velocidad	
	<i>Hz</i>	<i>r.p.m.</i>
100	5	300
500	10	600
1000	20	1200
1500	30	1800
2000	40	2400
2500	50	3000
3000		

Tabla 8.1.- Parámetros de carga-velocidad usados en las simulaciones.



Tendremos 35 estados de carga-velocidad diferentes (finalmente no se ensayan a 50 Hz) para cada serie de rodamientos “*s, e, i*” de los cuales se registraron 10 archivos.

Los 210 estados de carga-velocidad quedan registrados en 210 ficheros de datos. Cada fichero contiene la información de 100 medidas correspondientes a una serie de rodamientos y 10 medidas por rodamiento de la serie.

Cada medida se realiza durante un tiempo de 4 segundos a una frecuencia de muestreo de 5kHz, lo que supone un registro de 20000 datos tomados cada 0,0002 segundos. Para seleccionar los valores, se realizaron dos ensayos muestreando a 5kHz en un ensayo y a 10kHz en otro, para comprobar las diferencias.

## **2. TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO**

Durante los ensayos experimentales se atendió a las siguientes representaciones:

- En el campo temporal, la representación temporal de la señal de vibración captada por el acelerómetro y la envolvente de la señal temporal rectificada.
- En el campo frecuencial, se representa el espectro de potencia de la señal temporal y el espectro de potencia de la envolvente.
- En el campo tiempo-frecuencia, la representación del mapa wavelet de 0,2 segundos de la señal temporal y una escala de 128 puntos y el mapa wavelet de la envolvente de la señal temporal. La wavelet madre utilizada es la Daubechies 6. Se seleccionan estos parámetros por ser, tras muchas pruebas, los que mejores resultados aportaban.

### **3. ENSAYOS REALIZADOS**

#### **3.1. SEÑALES EXPERIMENTALES**

Primero se van a aportar dos ejemplos de los procesos: el primero (apartado 1.1) corresponde a un rodamiento SKF 6206 modificado con 3 bolas, y el segundo (apartado 1.2) corresponde a un rodamiento SKF 6206 de 9 bolas.

Primero se presentará la señal temporal, y la envolvente rectificada de la señal temporal, comentando las características peculiares que cada una presenta.

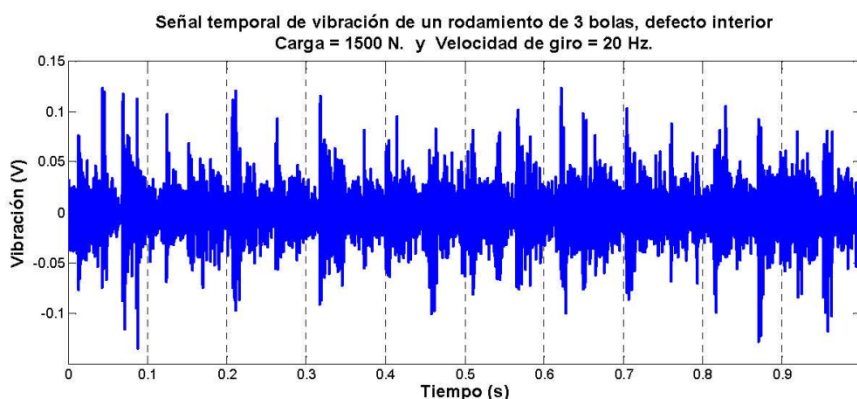
Seguidamente se muestran el espectro de la señal temporal y el espectro de la envolvente donde se han señalado las frecuencias características que pueden identificarse.

Finalmente, se comentan las características de la imagen de los coeficientes de la transformada wavelet de la señal temporal y la wavelet de la envolvente.

Al seguir un procedimiento similar para los rodamientos de 3 y 9 bolas, nos vamos a fijar en los que conciernen al rodamiento de 9 bolas.

#### **1.1 Rodamiento de 3 bolas con defecto en el anillo interno, carga de 1500N y velocidad de giro de 20 Hz**

En las siguientes figuras se muestran la señal temporal y la envolvente de la señal rectificada respectivamente. Se observa los picos de paso por defecto pero hace prácticamente imposible identificar de qué tipo de defecto se trata.



**Figura 8.3.- Señal temporal de un rodamiento SKF 6206 con defecto en la pista interna, con 3 bolas.**

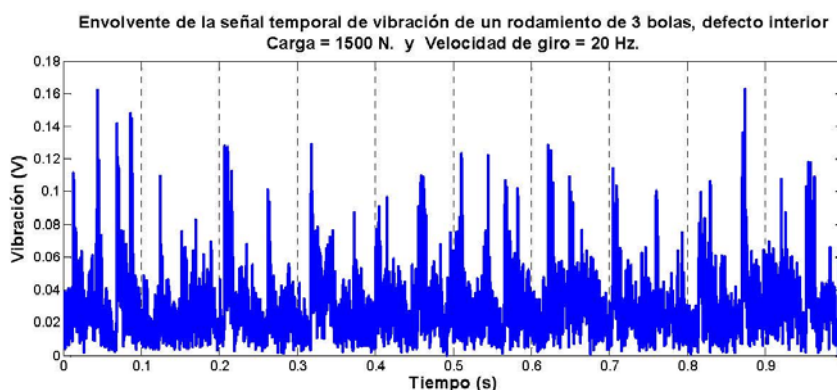


Figura 8.4.- Envolvente de la señal temporal de un rodamiento SKF 6206 con defecto en la pista interna, con 3 bolas.

En la Figura 8.5 se muestra el espectro de potencia de la señal temporal de la Figura 8.3. Se aprecia rápidamente una frecuencia de resonancia alrededor de los 800 Hz pero no podemos cualificar ni cuantificar defecto alguno. Sin embargo, el espectro de la envolvente (Figura 8.6) sí que muestra una representación donde se puede apreciar las frecuencias características de defecto.

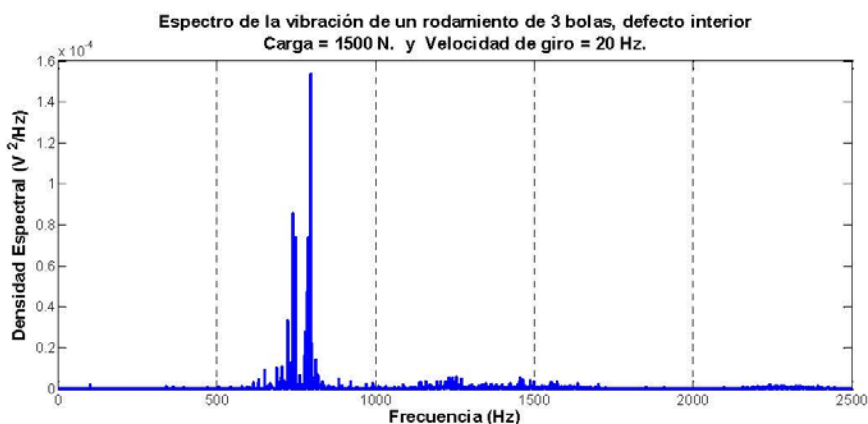


Figura 8.5.- Espectro de la señal temporal representada.

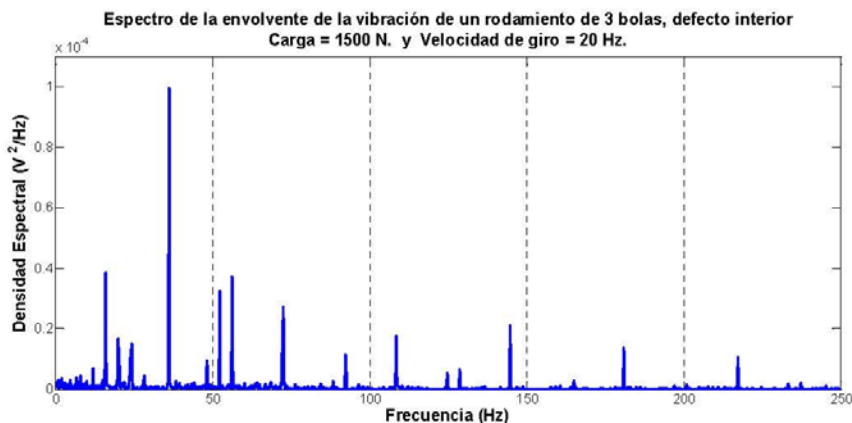
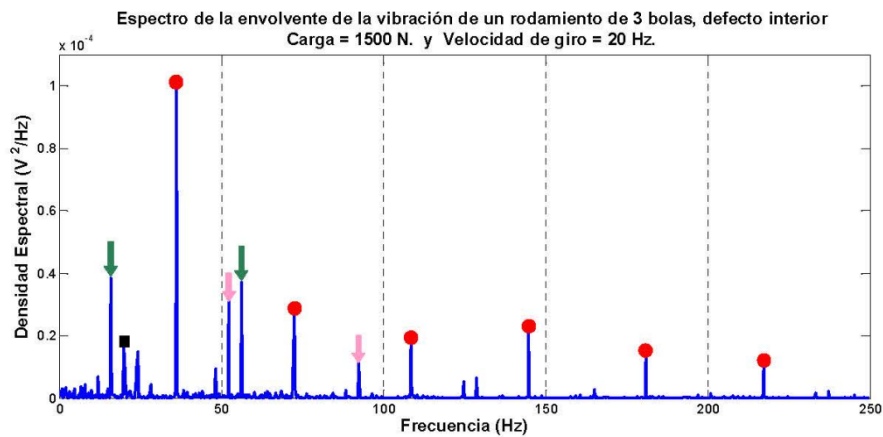


Figura 8.6.- Espectro de la envolvente de la señal temporal.



**Figura 8.7.- Frecuencias características sobre el espectro de la envolvente de la señal temporal.**

En la figura se muestra un detalle del espectro de la envolvente de la señal temporal donde se encuentran unas marcas que corresponden a las frecuencias características de este tipo de defecto que se describen seguidamente:

- El pico finalizado en un cuadrado negro es el primer armónico de la frecuencia de giro, su valor es de  $n = 20$  Hz
- Los picos finalizados con un punto rojo son los armónicos correspondientes a la frecuencia de fallo en anillo interior.

$$BPFI = 36,2 \text{ Hz}$$

- Los dos picos coronados por flechas verdes son las bandas laterales que aparecen a cada lado del primer armónico de la frecuencia de fallo en anillo interior:

$$BPFI - n = 16,2 \text{ Hz}$$

$$BPFI + n = 56,2 \text{ Hz}$$

- Los dos picos coronados por flechas rosas son las bandas laterales que aparecen a cada lado del segundo armónico de la frecuencia de fallo en anillo interior:

$$2 \cdot BPFI - n = 52,4 \text{ Hz}$$

$$2 \cdot BPFI + n = 92,4 \text{ Hz}$$

En la figura 8.8 se muestra el mapa wavelet de la señal temporal y de la envolvente de la señal temporal.

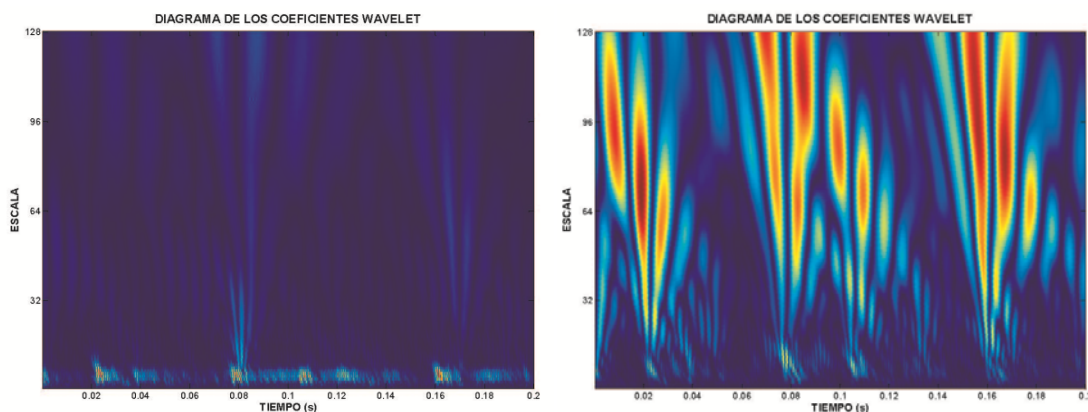


Figura 8.8.- Mapa wavelet de la señal temporal y de la envolvente de la señal temporal.

Se aprecia que es un defecto típico de aro interior, pues se aprecia en alta frecuencia (parte inferior de la escala con marcas rojas-amarillas) con rastros hacia baja frecuencia (parte alta de la escala en azul claro).

El mapa wavelet de la envolvente, se observa igualmente los picos a alta frecuencia (parte baja de la escala) pero se observa claramente los picos a baja y media frecuencia correspondientes al paso por el fallo (rastros rojos).

## 1.2 Rodamiento de 9 bolas con defecto en el anillo externo, carga de 1000 N y velocidad de giro de 30 Hz

En las Figuras 8.9 y 8.10 se muestran la señal temporal y la envolvente de la señal rectificada respectivamente. Se observa los picos de paso por defecto pero no es imposible identificar y asegurar de qué tipo de defecto se trata, aunque pudiera parecer que existe modulación en los picos y consecuentemente defecto en anillo interno.

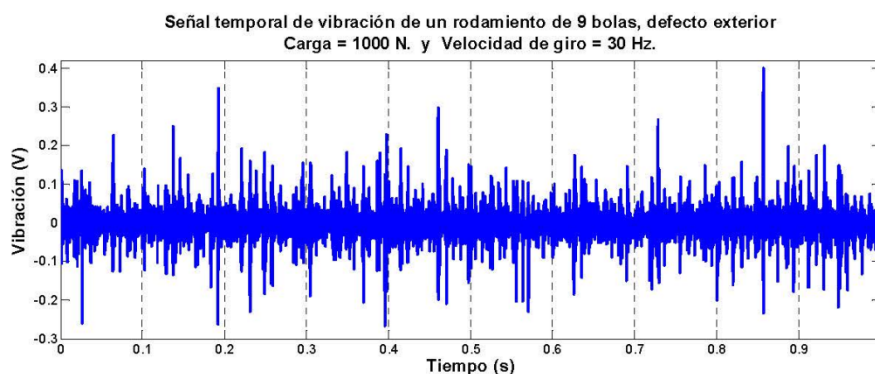


Figura 8.9.- Señal temporal de un rodamiento SKF 6206 con defecto en la pista externa, con 9 bolas.

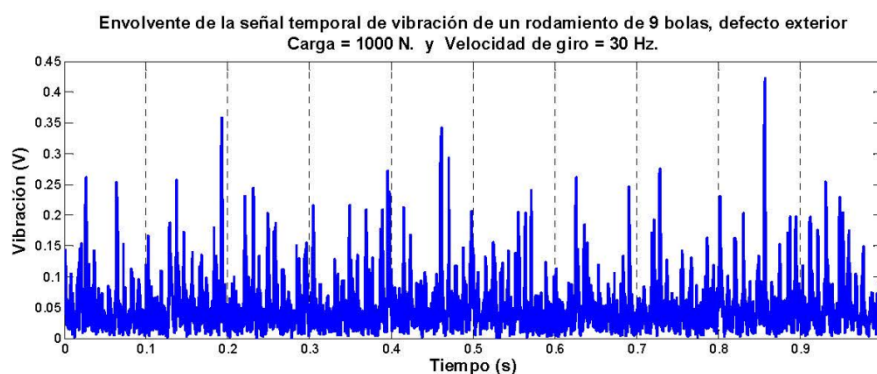


Figura 8.10.- Envolvente de la señal temporal de un rodamiento SKF 6206 con defecto en la pista externa, con 9 bolas.

En la Figura 8.11 se muestra el espectro de potencia de la señal temporal de la Figura 8.9.

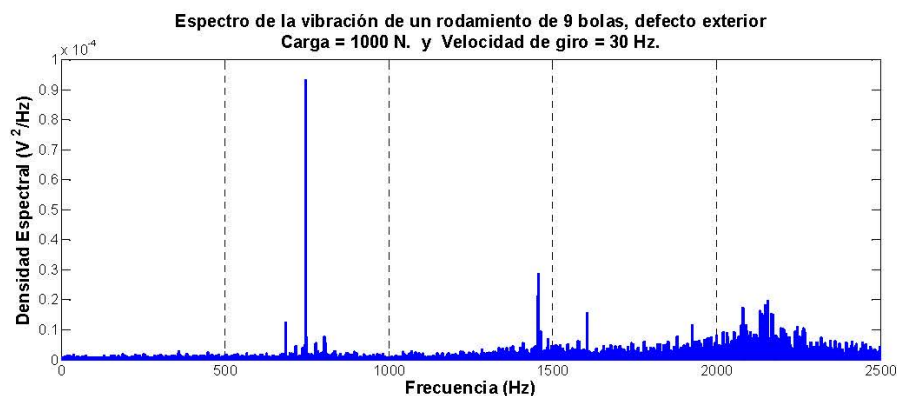


Figura 8.11.- Espectro de la señal temporal.

Como en el rodamiento de 3 bolas, se aprecia también una frecuencia de resonancia alrededor de los 800 Hz, pero además aparecen resonancias en la banda que va de 900 Hz a 2500 Hz que no aparecían en el rodamiento de 3 bolas, aunque no podemos cualificar ni cuantificar defecto alguno.

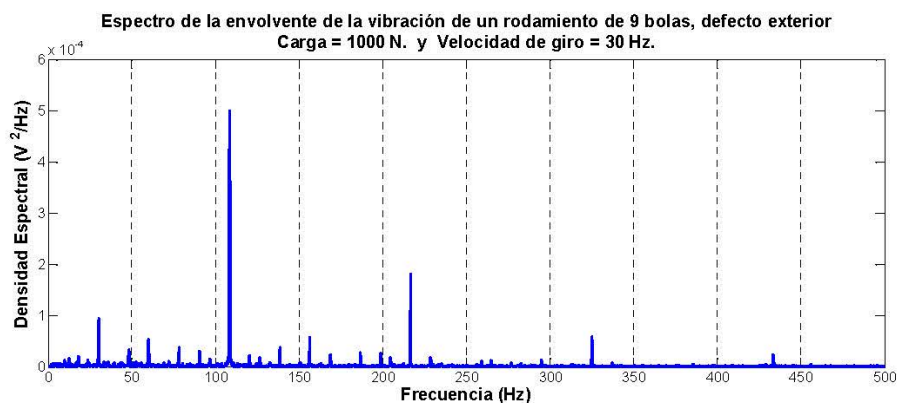
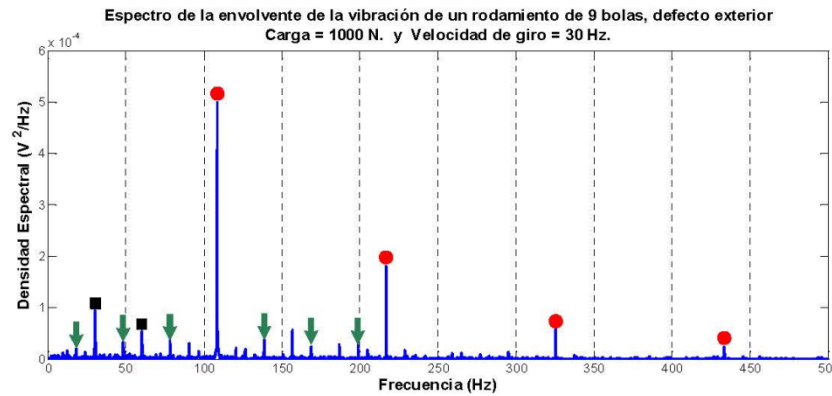


Figura 8.12.- Espectro de la envolvente de la señal temporal.

Sin embargo, el espectro de la envolvente (Figura 8.12) sí que muestra una representación donde se puede apreciar las frecuencias características de defecto.



**Figura 8.13.- Frecuencias características sobre el espectro de la envolvente de la señal temporal.**

- Los picos finalizados en un cuadrado negro son el primer y segundo armónico de la frecuencia de giro:

$$n = 30 \text{ Hz}$$

- Los picos finalizados con un punto rojo son los armónicos correspondientes a la frecuencia de fallo en anillo exterior

$$BPFE = 107,1 \text{ Hz}$$

- Los dos picos coronados por flechas verdes son las bandas laterales que aparecen a cada lado del primer armónico de la frecuencia de fallo en anillo interior:

$$BPFE - n = 77,1 \text{ Hz}$$

$$BPFE + n = 137,1 \text{ Hz}$$

$$BPFE - 2 \cdot n = 47,1 \text{ Hz}$$

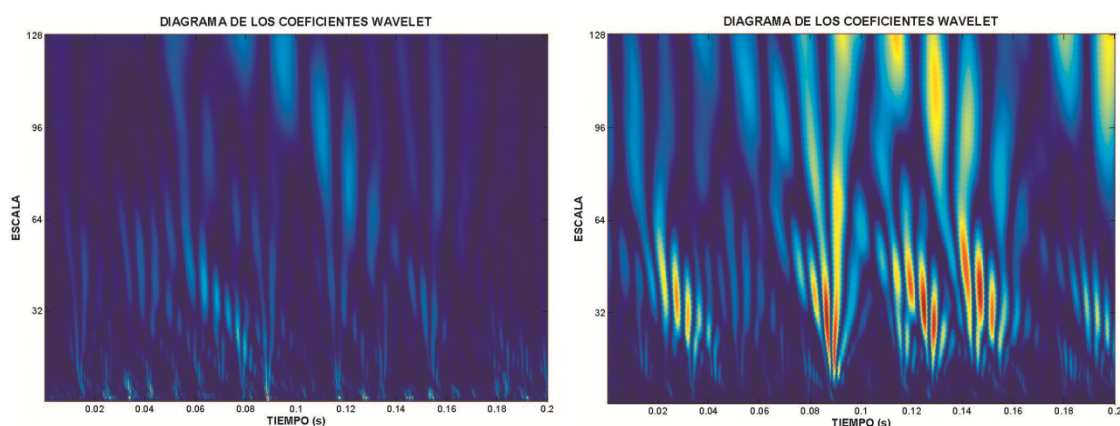
$$BPFE + 2 \cdot n = 167,1 \text{ Hz}$$

$$BPFE - 3 \cdot n = 17,1 \text{ Hz}$$

$$BPFE + 3 \cdot n = 197,1 \text{ Hz}$$

En la Figura 8.14 se muestra el mapa wavelet de la señal temporal y de la envolvente de la señal temporal respectivamente.





**Figura 8.14.- Mapa wavelet de la señal temporal y de la envolvente de la señal temporal.**

Al corresponder estas figuras a un rodamiento de 9 bolas, las frecuencias típicas de defecto son mayores que en el rodamiento de 3 bolas.

Ahora, prácticamente son inapreciables en alta frecuencia (parte inferior de la escala con marcas rojas-amarillas) aunque sí aparecen los rastros hacia baja frecuencia (parte alta de la escala en azul claro).

En el mapa wavelet de la envolvente, tampoco se aprecian los picos a alta frecuencia (parte baja de la escala) pero se observa claramente los picos a baja y media frecuencia correspondientes a paso por el fallo (rastros rojos), con una menor banda de frecuencia y menos espaciados que en el caso de rodamiento de 3 bolas.

### **1.3. Análisis comparativo de rodamiento de 3 bolas con rodamiento de 9 bolas sin defecto, carga de 1500 N. y velocidad de giro de 20 Hz**

Cuando estamos midiendo un rodamiento nuevo (en ausencia de defecto), lo que vemos en los diagramas es una representación de la señal originada por el rodamiento más la señal derivada del comportamiento del sistema donde se encuentra integrado el rodamiento.

Las señales pudieran parecer solo ruido (Figura 8.15), ya sea en un rodamiento SKF 6206 o en el rodamiento modificado con tres bolas. Sin embargo, su representación espectral, Figura 8.16, varía apareciendo picos a baja frecuencia de mayor intensidad en el rodamiento de 3 bolas. Esto es especialmente significativo en el espectro de la envolvente, figura 8.17, porque se ve con mucha más claridad las frecuencias de giro o los armónicos de las frecuencias de giro en el rodamiento de 9 bolas.

Señal temporal de vibración de un rodamiento sin defecto, Carga = 1500 N. y Velocidad de giro = 20 Hz.  
3 BOLAS

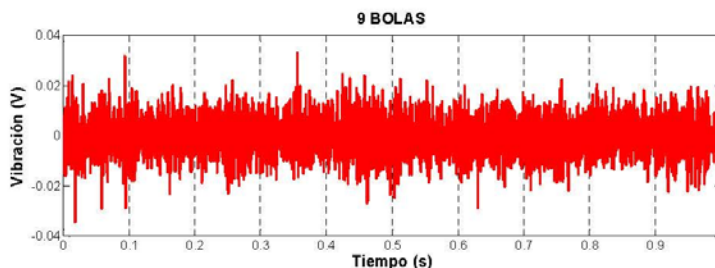
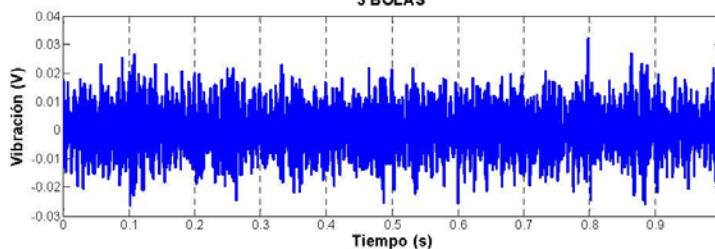


Figura 8.15.- Señales temporales correspondientes a rodamientos de 3 y 9 bolas.

Espectro de la vibración de un rodamiento sin defecto, Carga = 1500 N. y Velocidad de giro = 20 Hz.

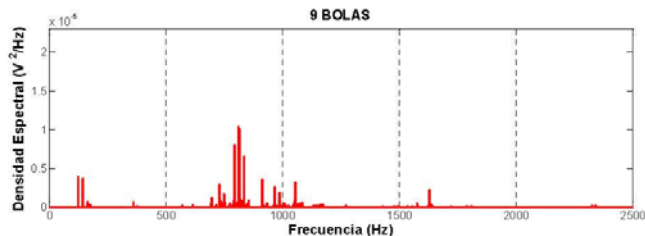
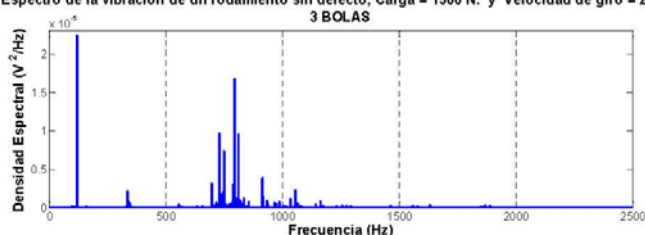


Figura 8.16.- Espectro de las señales temporales correspondientes a rodamientos de 3 y 9 bolas.

Espectro de la envolvente de la vibración de un rodamiento sin defecto, Carga = 1500 N. y Velocidad = 20 Hz.

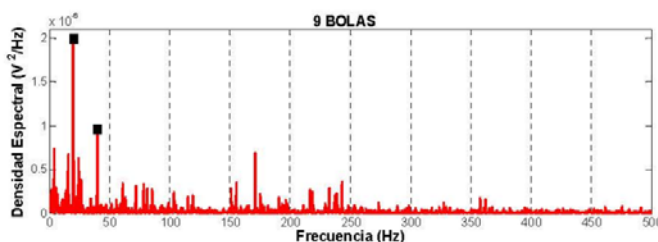
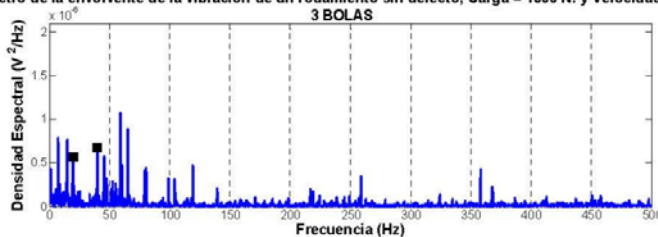
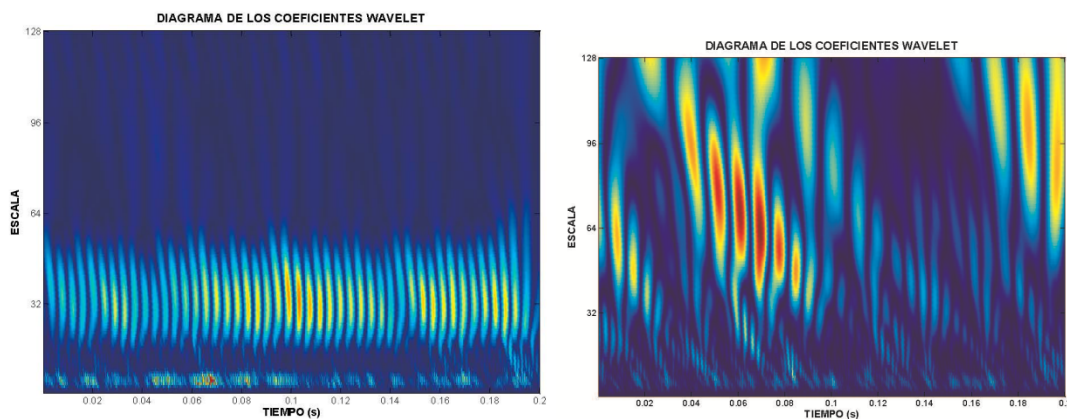
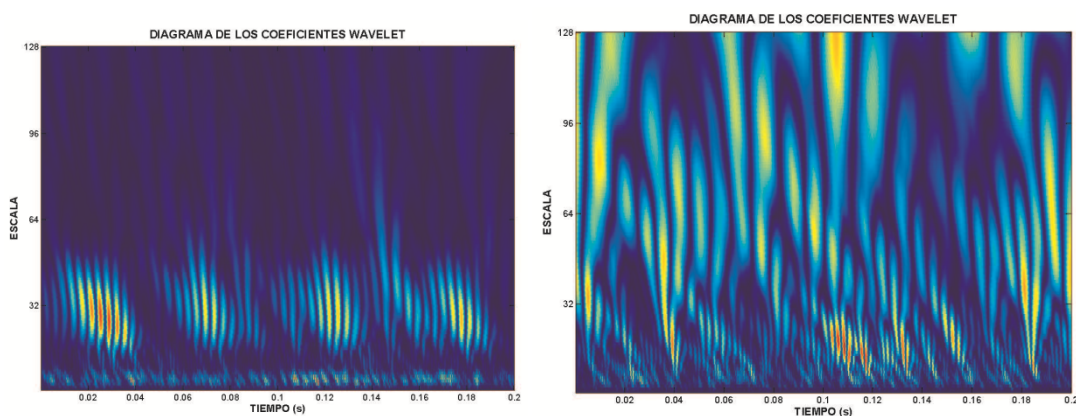


Figura 8.17.- Espectro de las envolventes de las señales temporales correspondientes a rodamientos de 3 y 9 bolas.

De las distintas representaciones de los mapas wavelet, solamente mencionar que en el mapa wavelet del rodamiento de 3 bolas aparece una frecuencia de resonancia de baja frecuencia prácticamente continua, mientras que en el rodamiento de 9 bolas, esto sucede periódicamente.



**Figura 8.18.- Mapa wavelet de la señal temporal y mapa wavelet de la envolvente de la señal temporal del rodamiento de 3 bolas.**



**Figura 8.19.- Mapa wavelet de la señal temporal y mapa wavelet de la envolvente de la señal temporal del rodamiento de 9 bolas.**

#### **1.4. Análisis comparativo de la aparición de defecto en el rodamiento. Rodamiento de 9 bolas**

En las señales temporales registradas, se observa que cuando aparecen los defectos se aprecian picos de tipo impulsivo. En el caso de defecto en el anillo externo, estos son muy repetitivos tanto en la secuencia de aparición como en la magnitud. En el caso de defecto en el anillo interno, existen ocasiones en que los picos de defecto no aparecen y su amplitud fluctúa de acuerdo con la carga que la bola que pasa por el defecto tenga en ese instante. Los picos correspondientes al defecto en anillo externo tienen mayor amplitud que los picos que corresponden al defecto en anillo interno. Hay que señalar

que la posición del defecto en el anillo externo durante los ensayos se colocaba en la zona de máxima carga. Se aprecia además, que en el rodamiento sin defecto, los armónicos principales se encuentran a baja frecuencia.

Esto es válido tanto para el caso de 9 bolas como para el de 3 bolas, aunque en este último se aprecia con mayor claridad el defecto en el anillo externo.

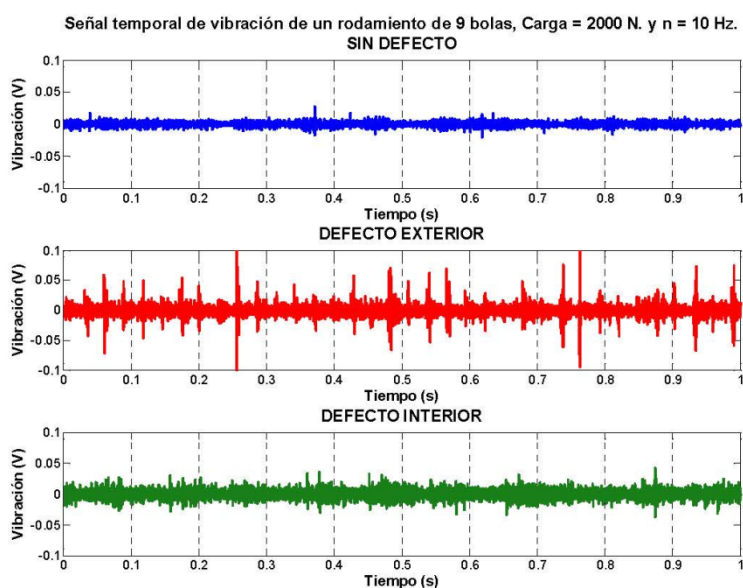


Figura 8.20.- Señales temporales correspondientes a rodamientos con distintos defectos.

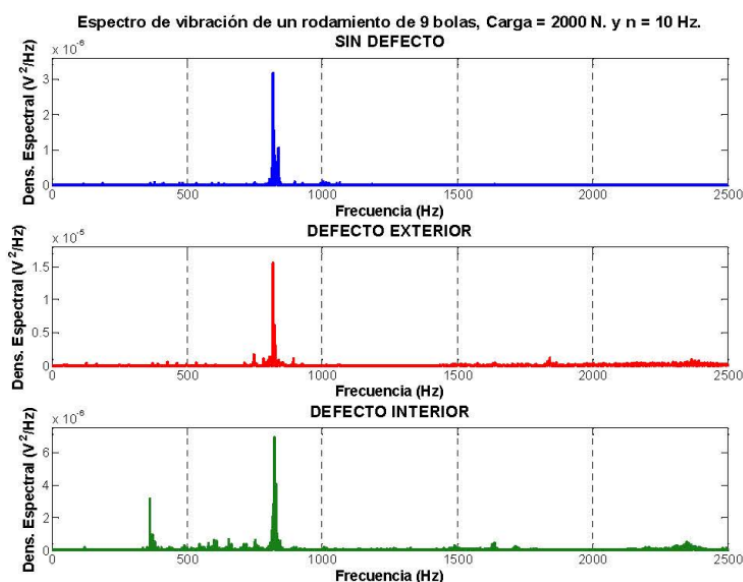


Figura 8.21.- Espectros de las señales temporales.

Respecto al espectro de la envolvente es especialmente significativo la señal sin defecto donde se aprecian con claridad el primer y segundo armónico de la frecuencia de giro, cosa que antes era inapreciable.

También en esta representación, en el fallo de defecto en el anillo interno se aprecian el armónico principal de la frecuencia de giro así como los cuatro primeros armónicos de la frecuencia de defecto característica del anillo interno con sus bandas laterales asociadas.

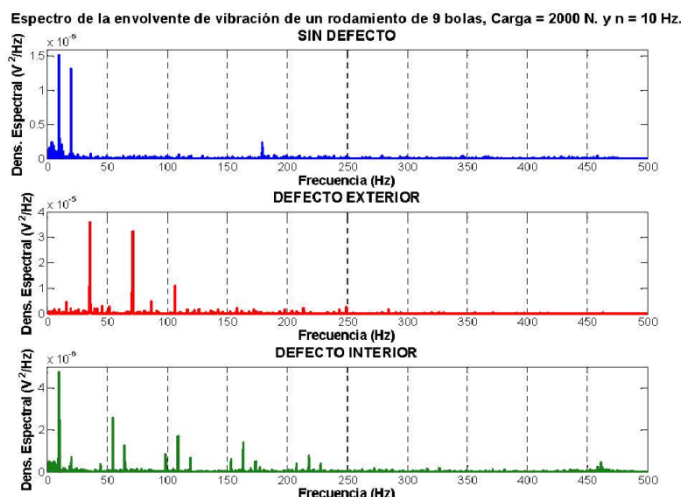


Figura 8.22.- Espectros de las envolventes de las señales temporales.

Respecto a los mapas wavelet que representan señales con defecto cumplen con las descripciones hechas anteriormente; sin embargo, el mapa wavelet que corresponde al rodamiento sin defecto podría ofrecer dudas de ser un defecto a alta velocidad de giro.

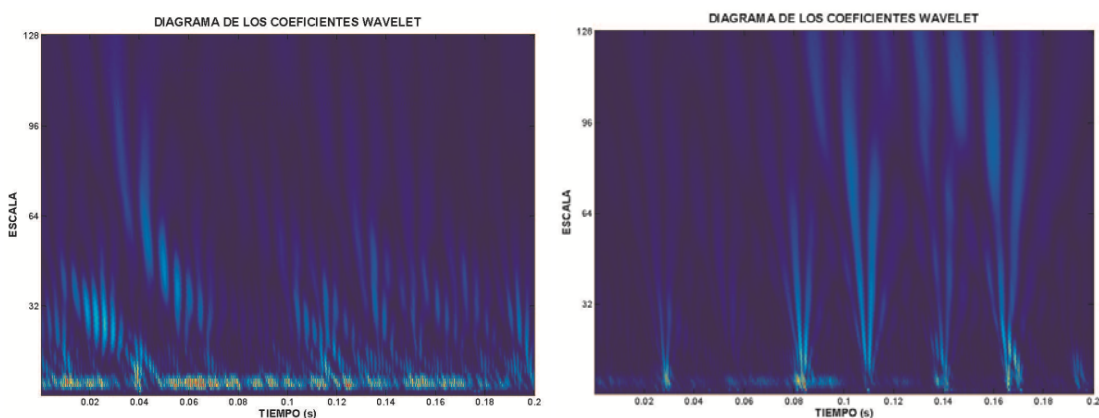


Figura 8.23.- Mapa wavelet de la señal temporal, sin defecto y con defecto en pista externa.



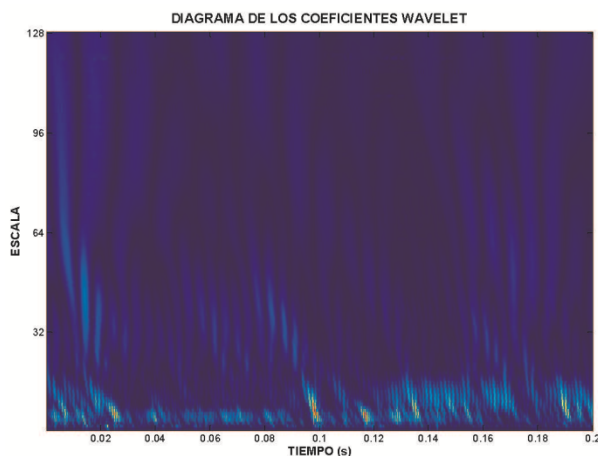


Figura 8.24.- Mapa wavelet de la señal temporal con defecto en pista interna.

### 1.5. Influencia de la carga y velocidad en la señal

La carga influye muy poco en los parámetros de la señal, en algunos casos es prácticamente constante y en otros aumenta ligeramente. Respecto a la velocidad de giro, sí que influye claramente en la señal.

En una señal temporal en un rodamiento cargado, a medida que aumenta la velocidad de giro, aumenta la frecuencia de aparición de picos de tipo impulsivo y también aumenta la magnitud de los mismos.

Respecto a la evolución del espectro de potencia, se observa como al tiempo que aumenta la velocidad de giro cada vez adquiere mayor valor los armónicos de mayor frecuencia.

Respecto a los espectros de la envolvente, según aumenta la velocidad de giro, aumenta el valor de la amplitud del armónico principal de la frecuencia de fallo.

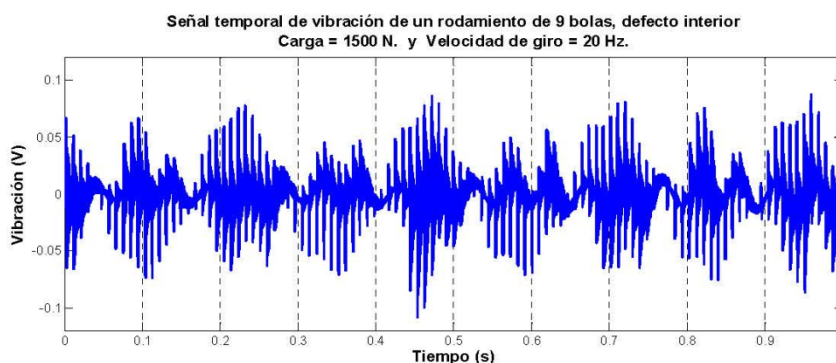
Respecto al análisis de los mapas wavelet, a medida que aumenta la velocidad angular, mayor es el número de picos en la parte baja de la escala (alta frecuencia).

### **3.2. SEÑALES SIMULADAS**

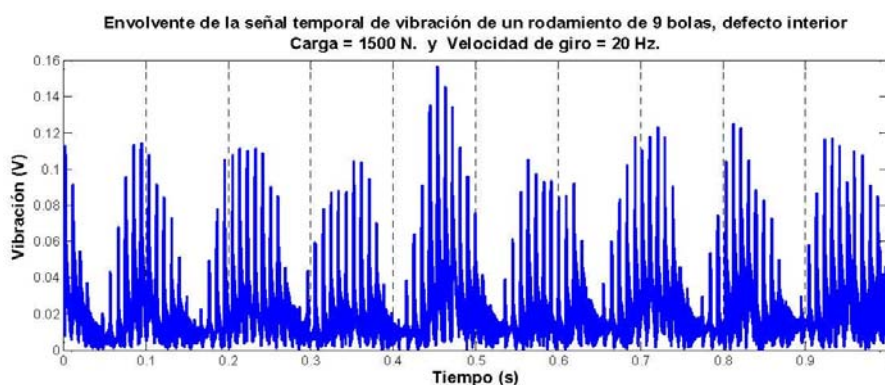
En esta sección se presentan varios ejemplos de señales obtenidas por simulación de los distintos modelos dinámicos para comprobar la coherencia de resultados.

#### **2.1. Modelo de 11 GDL (Rodamiento de 9 bolas) con defecto en el anillo interno, carga de 1500 N. y velocidad de giro de 20 Hz**

En las Figuras 8.25 y 8.26 se muestran la señal temporal y la envolvente de la señal rectificada respectivamente de un modelo de 11 GDL (rodamiento de 9 bolas) en las condiciones de funcionamiento referidas. Se observa en la señal simulada los picos de paso por defecto y la modulación de los mismos, característico de un defecto en anillo interno.



**Figura 8.25.- Señal temporal de un modelo de rodamiento con defecto en la pista interna, con 9 bolas.**



**Figura 8.26.- Envolvente de la señal temporal de un modelo de rodamiento con defecto en la pista interna, con 9 bolas.**

En la Figura 8.27 se muestra el espectro de potencia de la señal temporal, donde cabe destacar los picos que aparecen a las frecuencias alrededor de los 2kHz, correspondientes a frecuencias naturales del sistema complejo masa-muelle-amortiguamiento del modelo. En el espectro de la envolvente, Figura 8.28, se pueden apreciar las frecuencias



características de defecto, donde además las frecuencias del primer y segundo armónico de las frecuencias de defecto muestran sus respectivas bandas laterales.

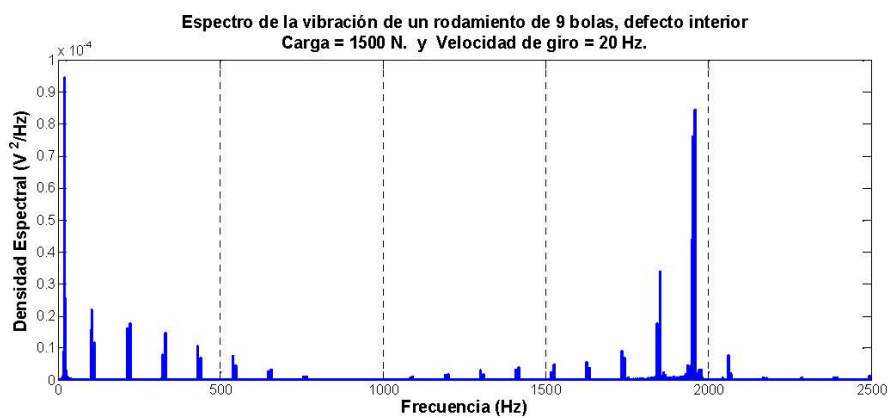


Figura 8.27.- Espectro de la señal temporal.

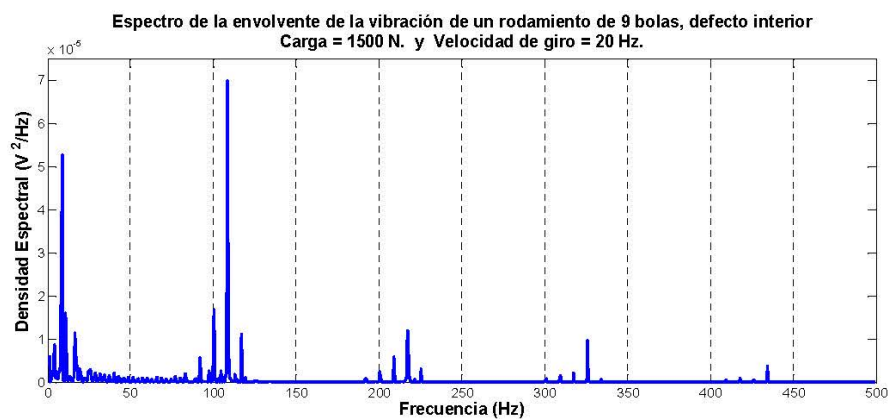


Figura 8.28.- Espectro de la envolvente de la señal temporal.

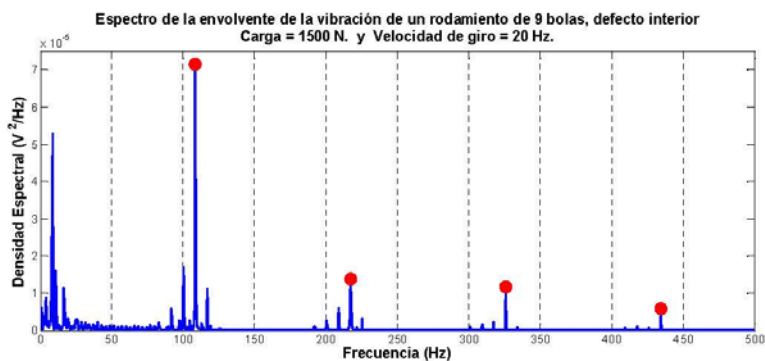


Figura 8.29.- Frecuencias características sobre el espectro de la envolvente de la señal.

Los picos finalizados con puntos rojos son los armónicos de la frecuencia de fallo BPF<sub>I</sub>=108,6Hz.

En la Figura 8.30 se muestran los mapas wavelet. Se aprecian picos en alta frecuencia (parte inferior de la escala). El mapa wavelet de la envolvente, se observa igualmente los picos a alta frecuencia (parte baja de la escala) pero se ven claramente los picos a baja y media frecuencia correspondientes a paso por el fallo (rastros rojos-amarillos).

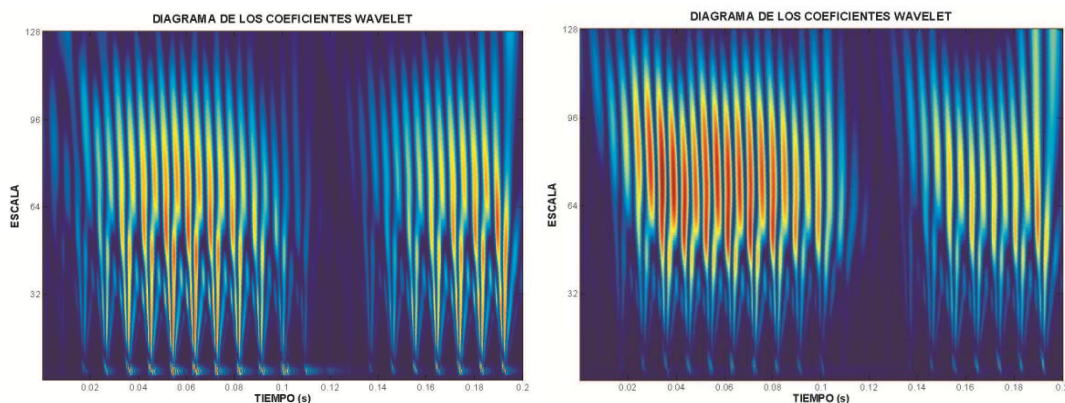


Figura 8.30.- Mapa wavelet de la señal temporal y mapa wavelet de la envolvente de la señal temporal.

## 2.2. Modelo 11 GDL (rodamiento de 9 bolas) con defecto en el anillo externo, carga de 1000 N. y velocidad de giro de 30 Hz

En las Figuras 8.31 y 8.32 se muestran la señal temporal y la envolvente de la señal rectificada respectivamente. Se observa los picos de paso por defecto que aparecen de forma regular.

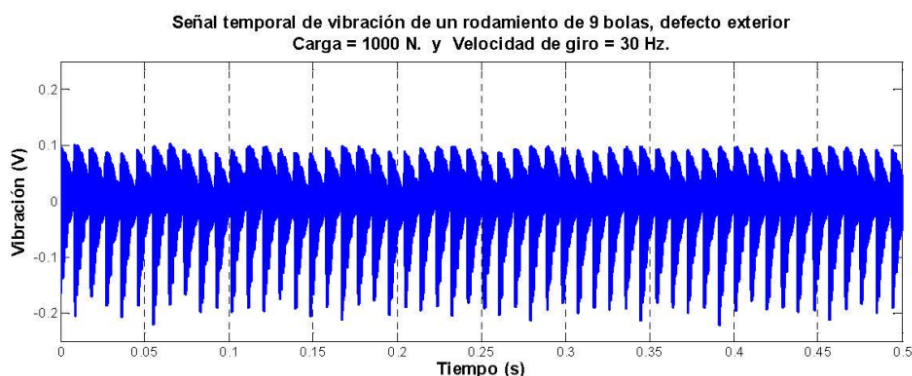


Figura 8.31.- Señal temporal de un modelo de rodamiento con defecto en la pista externa, con 9 bolas.

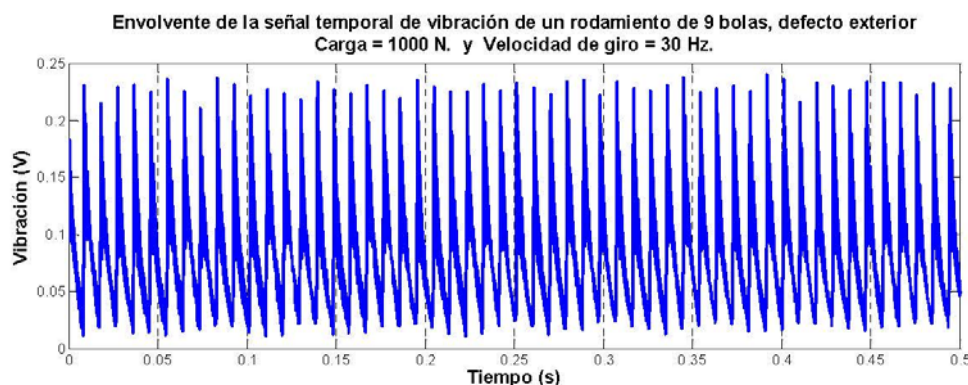


Figura 8.32.- Envelope de la señal temporal de un modelo de rodamiento con defecto en la pista externa, con 9 bolas.

En la Figura 8.33 se muestra el espectro de potencia de la señal temporal de la Figura 8.31. Se aprecia una frecuencia de resonancia alrededor de los 2 kHz., pero de la observación de la figura, no podemos cualificar ni cuantificar defecto alguno. Sin embargo, el espectro de la envolvente, Figuras 8.34 y 8.35 si que muestra una representación donde se puede apreciar claramente las frecuencias características de defecto de anillo externo, apareciendo los 4 primeros armónicos.

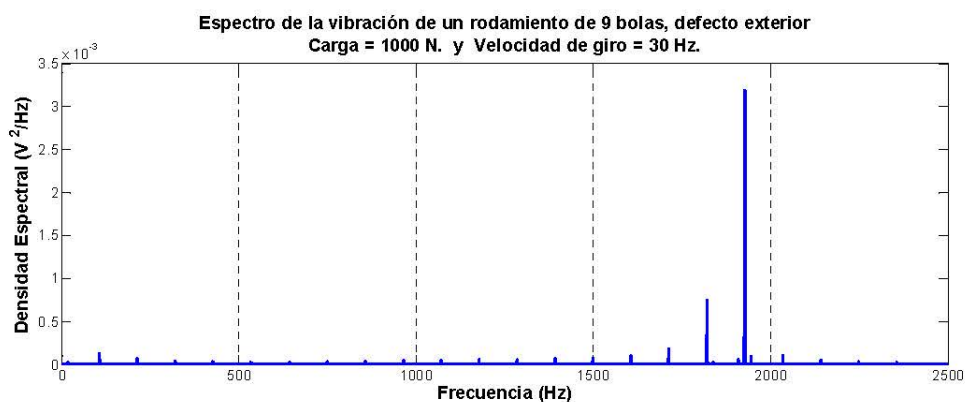


Figura 8.33.- Espectro de la señal temporal.

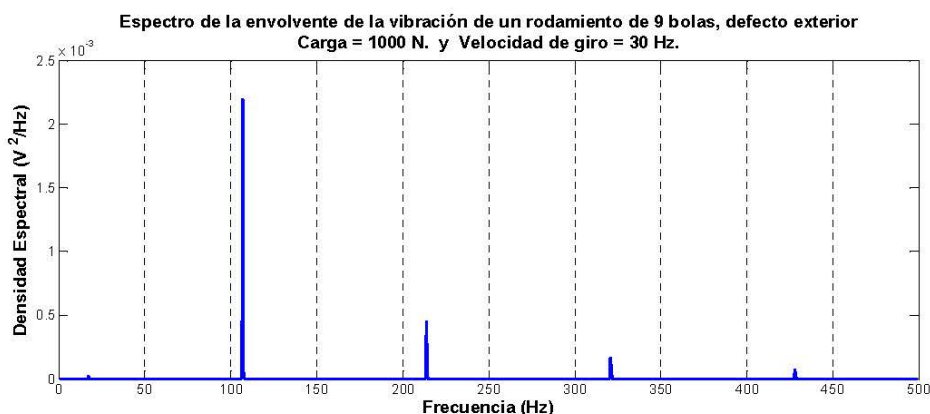


Figura 8.34.- Espectro de la envolvente de la señal temporal.

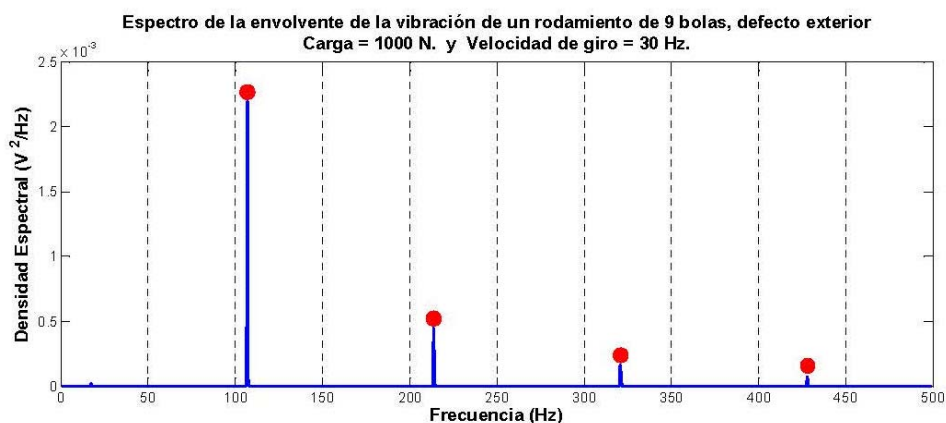


Figura 8.35.- Frecuencias características sobre el espectro de la envolvente de la señal temporal.

Los picos finalizados con puntos rojos son los armónicos de la frecuencia de fallo BPFE=107,1Hz.

En la Figura 8.36 se muestran los mapas wavelet de la señal temporal. Se aprecia las marcas en alta frecuencia (parte inferior de la escala con marcas rojas-amarillas) muy regulares con rastros hacia baja frecuencia (parte alta de la escala en azul claro). En el mapa wavelet de la envolvente tampoco se aprecian los picos a alta frecuencia (parte baja de la escala) pero se observa claramente los picos a baja y media frecuencia correspondientes a paso por el fallo (rastros rojos).

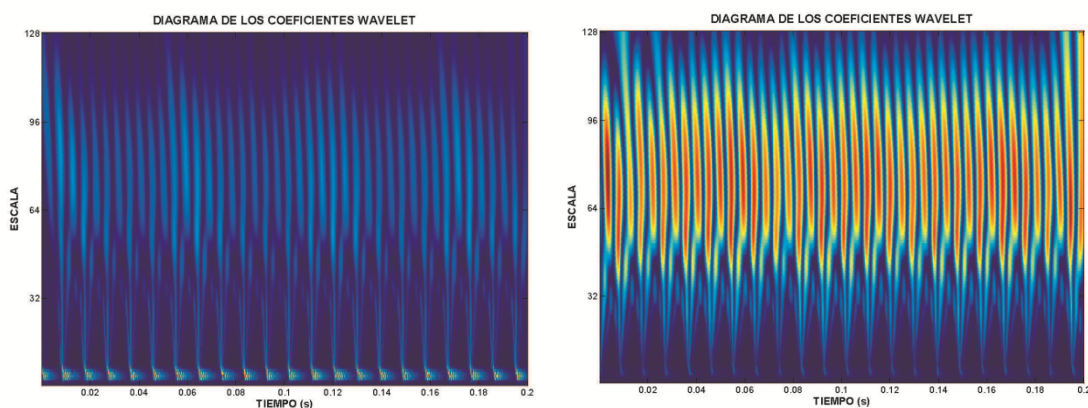


Figura 8.36.- Mapa wavelet de la señal temporal y mapa wavelet de la envolvente de la señal temporal.

### 2.3. Análisis comparativo de modelo 5 GDL (rodamiento de 3 bolas) con modelo de 11 GDL (rodamiento de 9 bolas) sin defecto

En ausencia de vibraciones causadas por elementos externos al rodamiento y ruidos aleatorios, lo que vemos en la Figura 8.37 son señales periódicas correspondientes al comportamiento de un sistema equivalente masa-muelle-amortiguamiento.

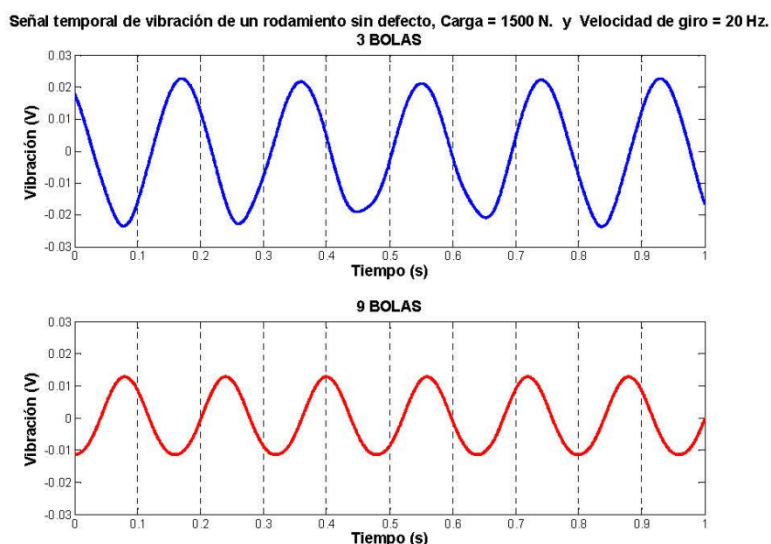


Figura 8.37.- Señales temporales correspondientes a modelos de rodamientos de 3 y 9 bolas.

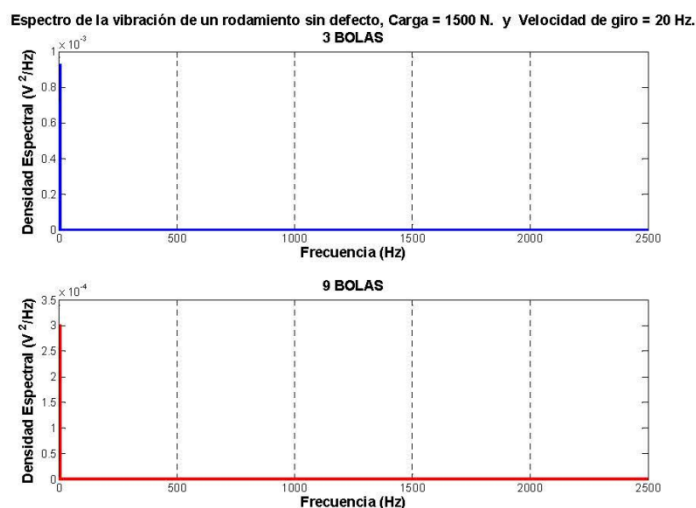


Figura 8.38.- Espectros de las señales temporales correspondientes a modelos de rodamientos de 3 y 9 bolas.

De las representaciones del espectro de potencia de la señal temporal y de la envolvente no es posible obtener información de la frecuencia de giro, aunque claramente se observa que no existe ningún pico correspondiente a defecto, tratándose en ambos casos de un rodamiento en buen estado.

Espectro de la envolvente de la vibración de un rodamiento sin defecto, Carga = 1500 N. y Velocidad = 20 Hz

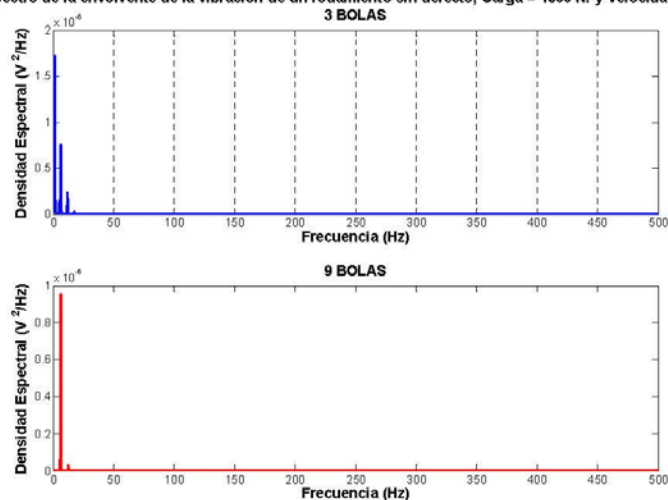


Figura 8.39.- Espectros de las envolventes de las señales temporales.

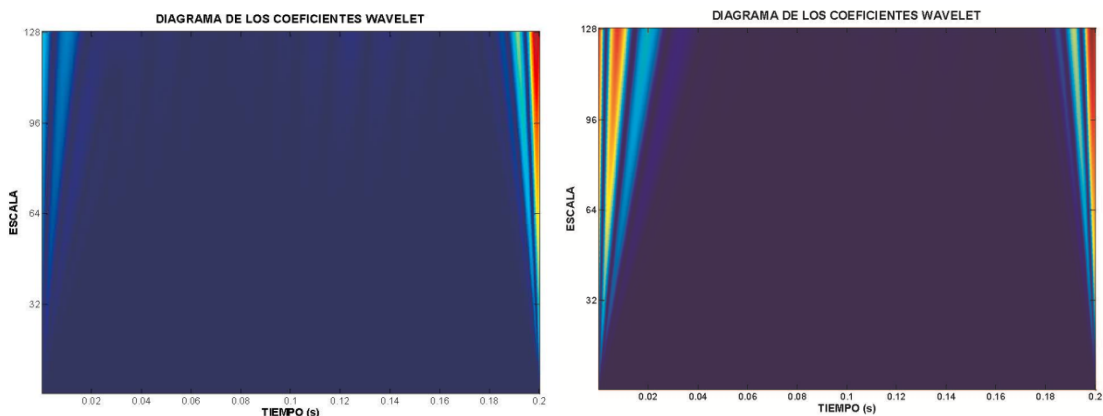


Figura 8.40.- Mapa wavelet de la señal temporal y mapa wavelet de la envolvente de la señal temporal en un rodamiento de 3 bolas.

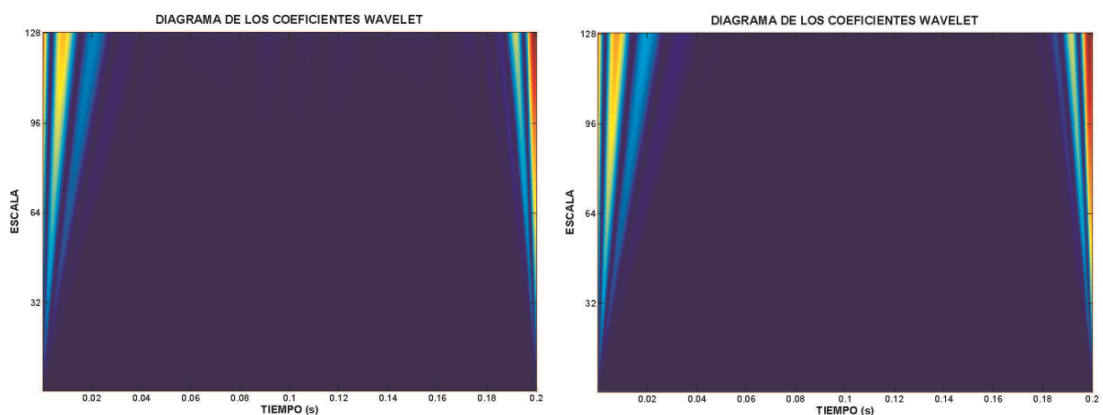


Figura 8.41.- Mapa wavelet de la señal temporal y mapa wavelet de la envolvente de la señal temporal en un rodamiento de 9 bolas.



## 2.4 Análisis comparativo de la aparición de defecto en el rodamiento. Modelo de 11 GDL.

De la señal temporal, Figura 8.42, se observa que cuando aparecen los defectos se aprecian picos de tipo impulsivo. En el caso de defecto en el anillo externo, estos son muy repetitivos tanto en la secuencia de aparición como en la magnitud. En el caso de defecto en el anillo interno, la amplitud de los picos de defecto fluctúa de acuerdo con la carga presentando la modulación de amplitud que caracteriza al defecto en anillo interno. Hay que señalar que la posición del defecto en el anillo externo durante las simulaciones se encontraba, en todos los casos, en la zona de máxima carga.

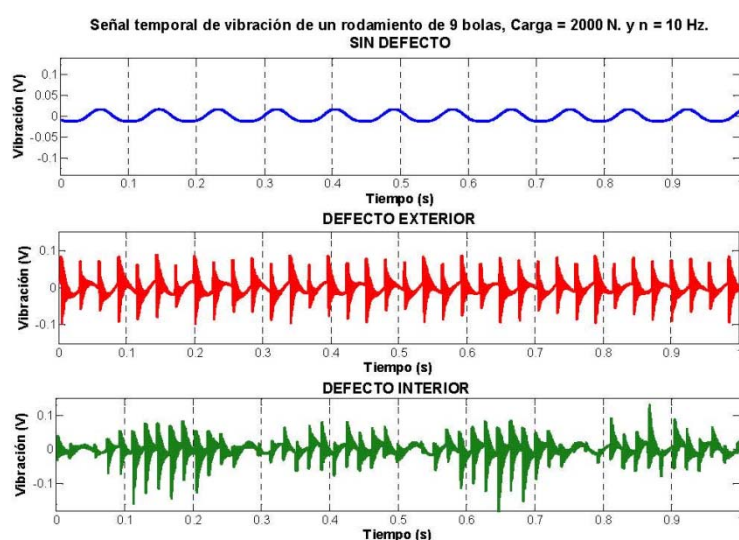


Figura 8.42.- Señales temporales correspondientes a modelos de rodamientos con distintos defectos.

En la Figura 8.43 se muestran el espectro de potencia de la señal temporal.

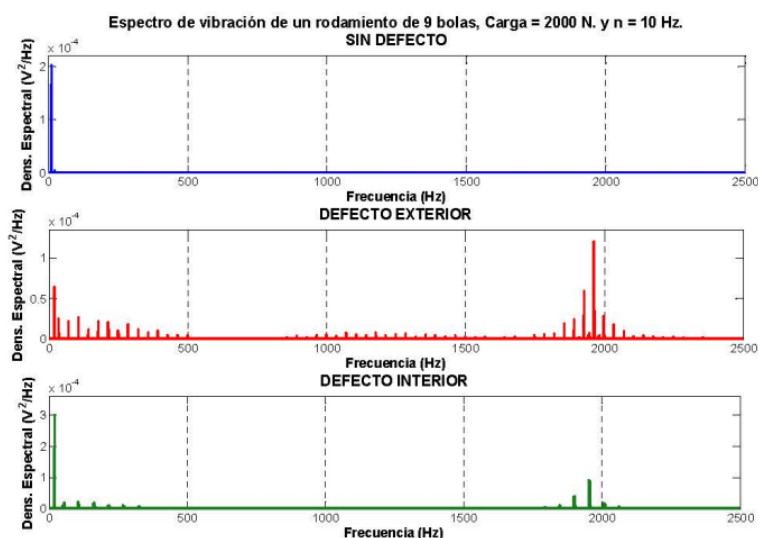


Figura 8.43.- Espectro de las señales temporales.



Se aprecia que aparece una frecuencia de resonancia alrededor de los 2 kHz cuando existe defecto, tanto en anillo interno como en anillo externo, pero de la observación de la figura, no podemos cualificar ni cuantificar defecto alguno.

Sin embargo, el espectro de la envolvente Figura 8.44, sí que muestra una representación donde se puede apreciar claramente las frecuencias características de defecto tanto en anillo externo como en anillo interno y varios armónicos.

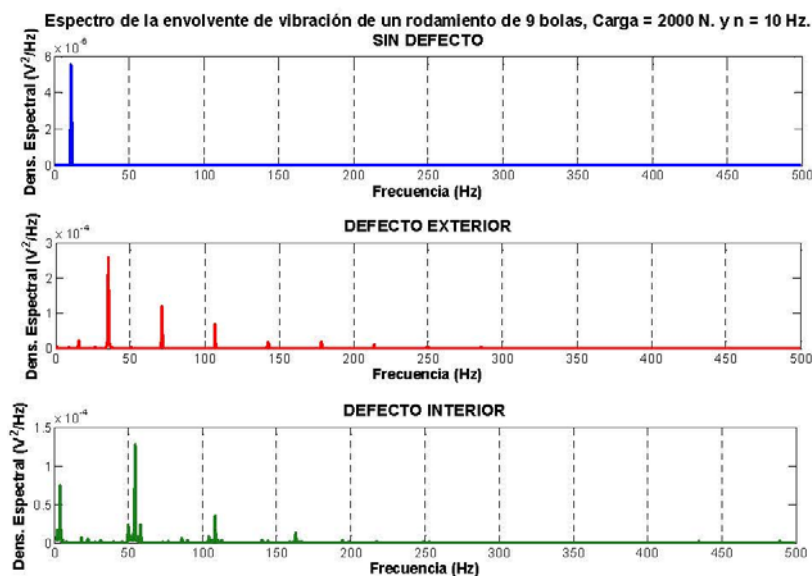


Figura 8.44.- Espectros de las envolventes de las señales temporales.

Respecto al análisis de los mapas wavelet solamente se aprecia que a medida que aumenta la velocidad angular, mayor es el número de picos en la parte baja de la escala (alta frecuencia).

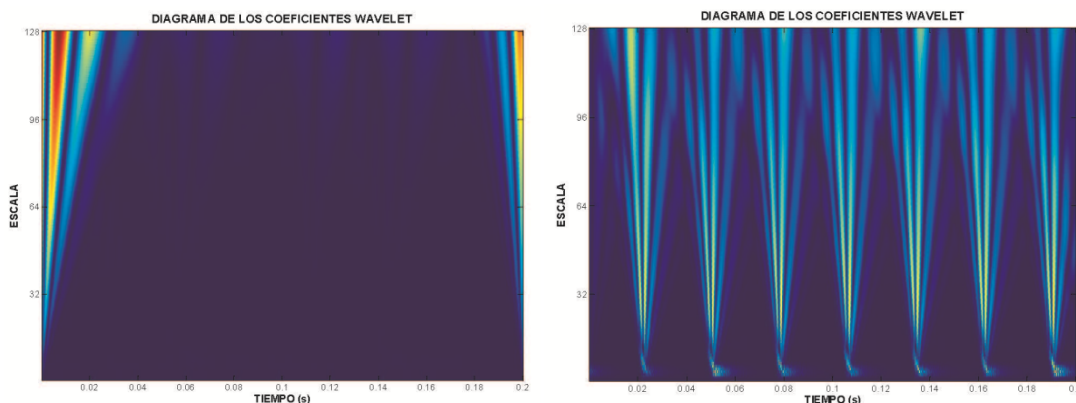


Figura 8.45.- Mapas wavelets de las señales temporales, sin defecto y en pista externa.

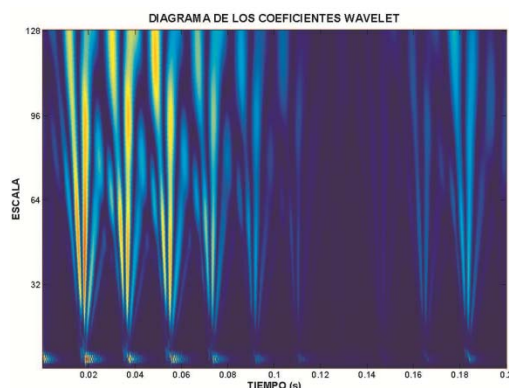


Figura 8.46.- Mapa wavelet de la señal temporal con defecto en pista interna.

## 2.5 Modelo de rodamiento de 9 bolas con presencia de defecto en la pista interior y la pista exterior, para varias velocidades

En presencia de defecto, la carga influye muy poco en los parámetros de la señal. Respecto a la velocidad de giro, si que influye claramente en la señal.

Si tomamos una señal temporal en modelo con defecto en el anillo exterior, cargado con 3000 N., a medida que aumenta la velocidad de giro, aumenta la frecuencia de aparición de picos de tipo impulsivo y también aumenta la magnitud de los mismos.

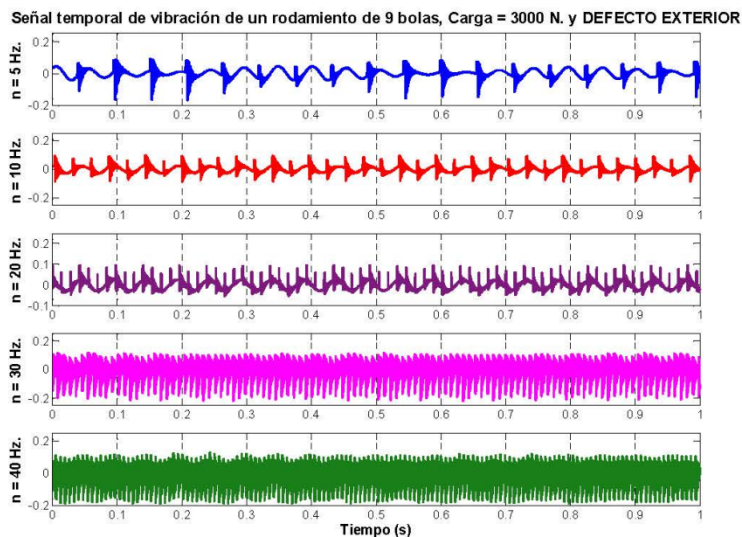


Figura 8.47.- Señales temporales de un modelo de rodamiento de nueve bolas, con defecto en la pista externa, girando a distintas velocidades.

Respecto a la evolución del espectro de potencia de las señales temporales, en la Figura 8.48, puede apreciarse que según aumenta la velocidad de giro, cada vez adquiere mayor valor los armónicos de mayor frecuencia en los casos de 30 y 40 Hz.

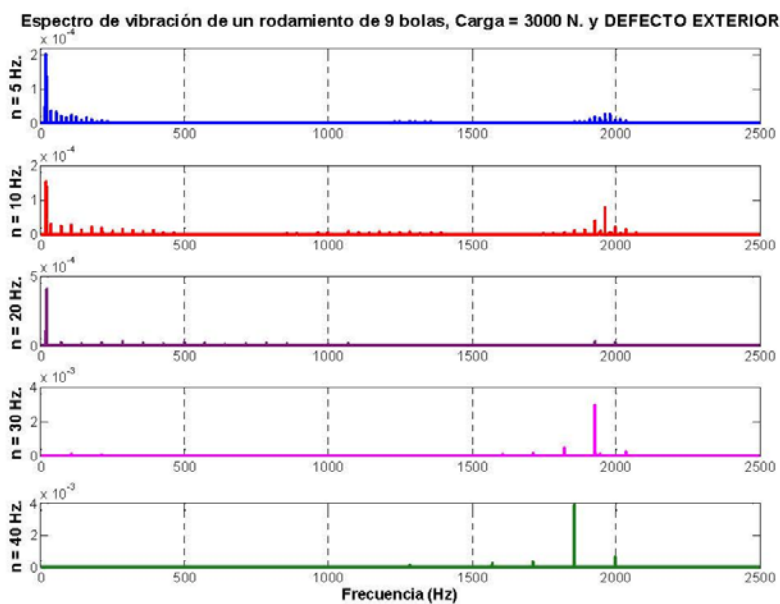


Figura 8.48.- Espectros de las señales temporales.

Respecto a los espectros de la envolvente, Figura 8.49, según aumenta la velocidad de giro, aumenta el valor de la amplitud del armónico principal de la frecuencia de fallo.

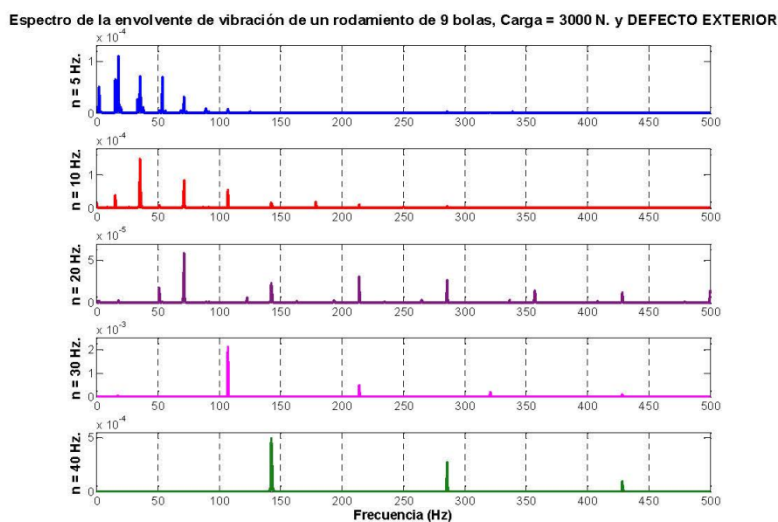


Figura 8.49.- Espectros de las envolventes de las señales temporales.

Por último, tenemos las representaciones de los mapas wavelet a distintas velocidades.

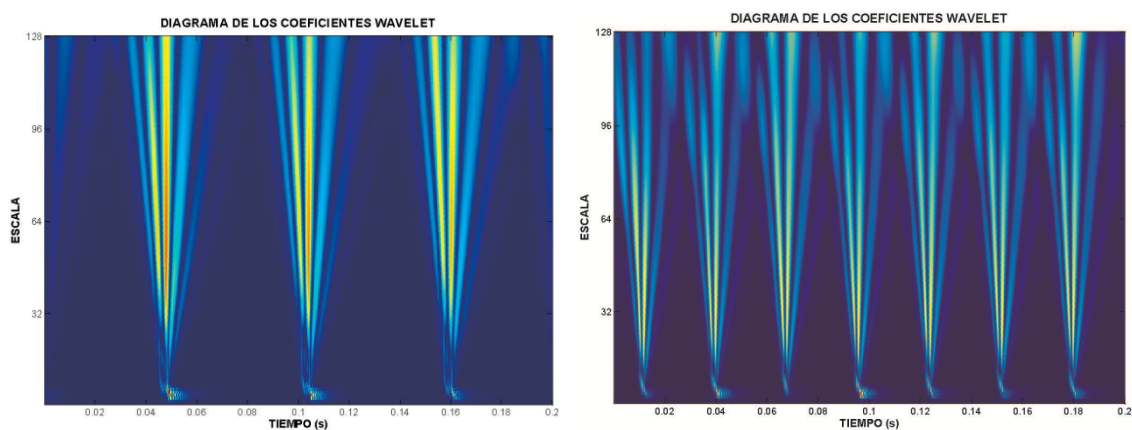


Figura 8.50.- Mapa wavelet de la señal temporal a 300 y 600 rpm.

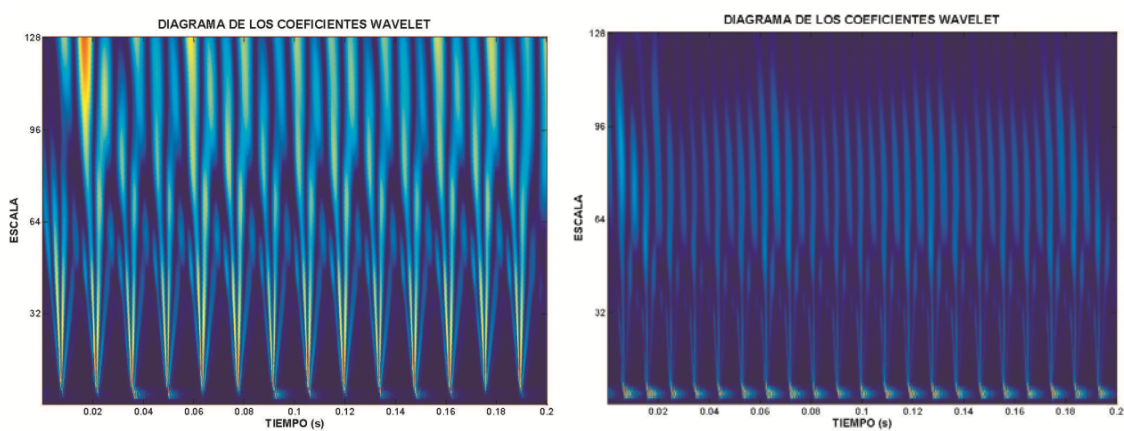


Figura 8.51.- Mapa wavelet de la señal temporal a 1200 y 1800 rpm.

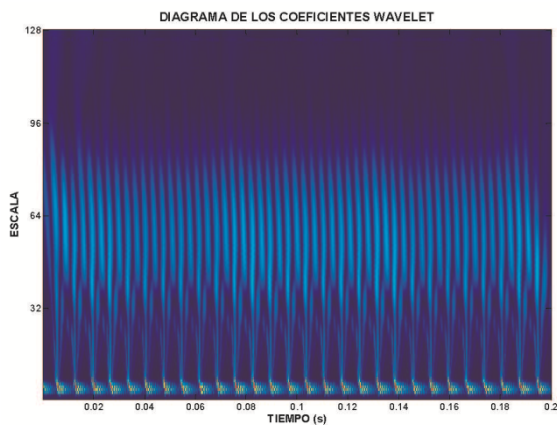
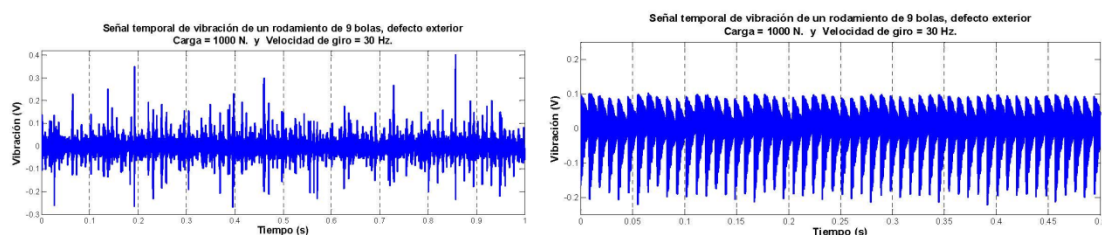


Figura 8.52.- Mapa wavelet de la señal temporal a 2400 rpm.

### 3.3. CONTRASTACIÓN SEÑALES EXPERIMENTALES Y SIMULADAS

De los ficheros experimentales obtenidos y su contraste con los análogos simulados, presentamos el caso típico de rodamiento de 9 bolas con defecto en anillo externo.

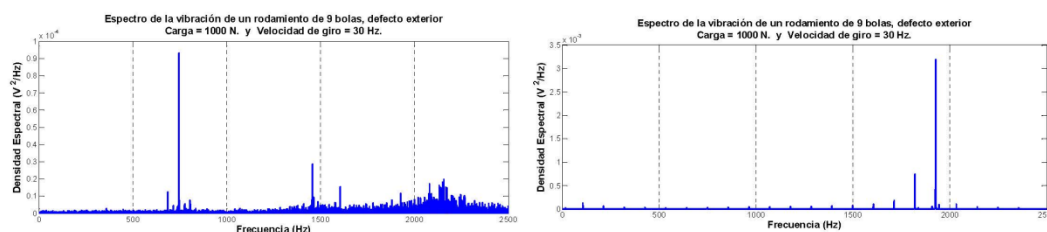
Las Figuras 8.53 representan las señales temporales experimental y simulada, correspondientes a un rodamiento SKF 6206, con defecto en la pista externa. Ambas señales presentan picos originados por un defecto en el rodamiento.



**Figura 8.53.- Señal temporal de un rodamiento real con defecto en la pista externa, y señal simulada de un modelo de rodamiento con 9 bolas con defecto en la pista externa.**

En la señal simulada se aprecia una alta regularidad de los picos y de ello se deduce que el defecto se encuentra en el anillo externo. La señal experimental se halla muy influenciada por vibraciones o ruidos externos al propio rodamiento y de la observación de la misma es fácil deducir que hay defecto pero no es tan sencillo deducir el tipo de defecto que tiene el rodamiento.

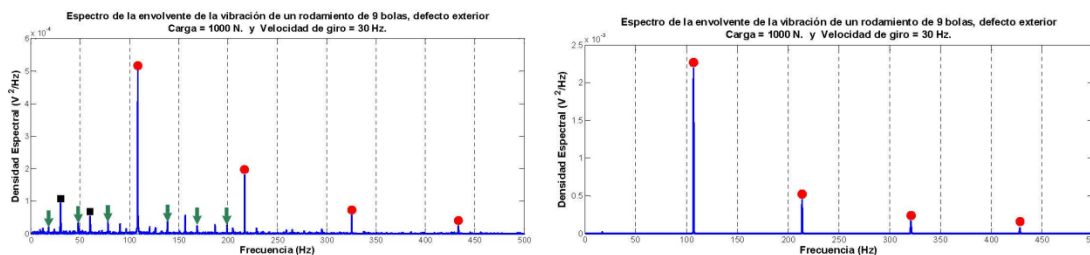
En el espectro de la señal temporal destacar los picos que aparecen alrededor de la frecuencia de 2 kHz, que si bien en la señal temporal se podrían atribuir a resonancias estructurales, no ocurre lo mismo en el modelo donde las resonancias estructurales no existen. Estos picos se deben por tanto, a las características propias del sistema simulado como masa, rigidez y amortiguamiento.



**Figura 8.54.- Espectros de las señales temporales experimental y simulada.**

El espectro de la envolvente de la señal temporal experimental guarda también una elevada similitud con el espectro de la envolvente de la señal simulada. En ambas figuras pueden apreciarse con claridad los cuatro primeros armónicos de la frecuencia de defecto (puntos rojos).

En la señal simulada no se ven bandas laterales, pero las que aparecen en la señal experimental son de tan pequeño tamaño que no son significativas.



**Figura 8.55.- Frecuencias características sobre el espectro de la envolvente de la señal, real y simulada.**

De lo anterior se ha observado que el análisis del espectro de la envolvente de la señal temporal vibratoria, en el caso experimental y simulado, arroja similares resultados con lo que el contraste es aceptado.

### **3.4. EVOLUCION DE LA POTENCIA ESPECTRAL TOTAL EN LAS SEÑALES EXPERIMENTALES**

En este apartado se muestran las curvas de evolución de la potencia espectral con la velocidad de giro y con la carga para los rodamientos de 9 bolas, sin defecto, con defecto en anillo externo, y con defecto en anillo interno.

Para construir cada gráfica es necesario procesar los datos originados a partir de las combinaciones de 7 cargas (100N, 500N, 1000N, 1500N, 2000N, 2500N y 3000N) con 5 velocidades (5Hz, 10Hz, 20Hz, 30Hz y 40Hz). Cada una de estas posibles combinaciones genera 100 archivos (series de 10 archivos de 10 rodamientos). En total, en cada gráfico se están procesando 3500 archivos de datos con un contenido de 70 millones de datos.



## Modelos de rodamiento sin defecto

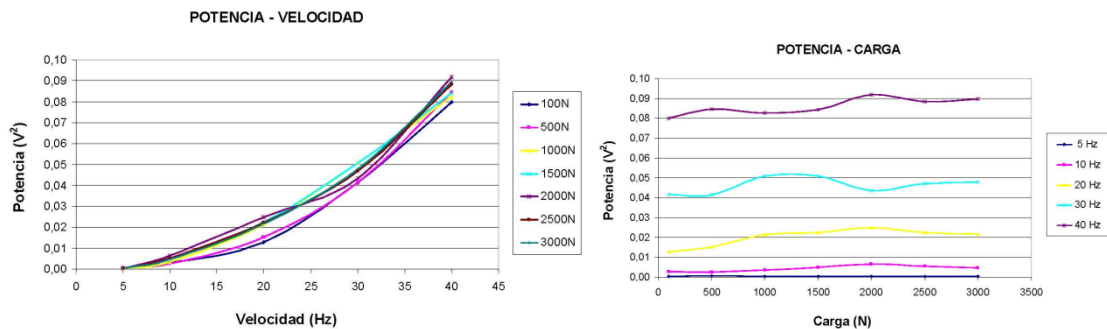


Figura 8.56.- Evolución de la Potencia Espectral con la velocidad de giro, para diferentes cargas y con la carga, para diferentes velocidades de giro.

## Modelo de rodamiento con defecto en la pista exterior

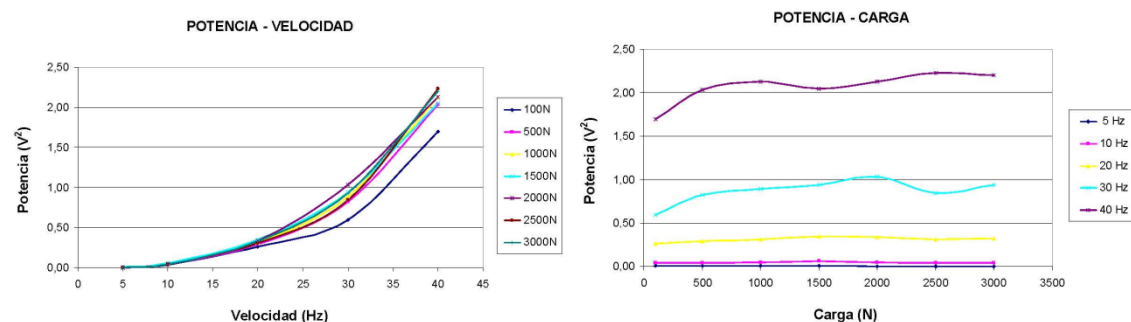


Figura 8.57.- Evolución de la Potencia Espectral con la velocidad de giro, para diferentes cargas y con la carga, para diferentes velocidades de giro.

## Modelo de rodamiento con defecto en la pista interior

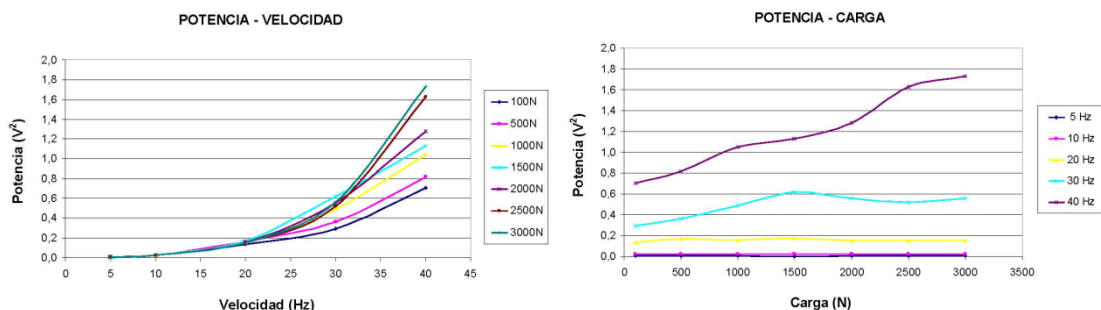


Figura 8.58.- Evolución de la Potencia Espectral con la velocidad de giro, para diferentes cargas y con la carga, para diferentes velocidades de giro.



Se observa en todos los casos que la potencia espectral crece con la velocidad de giro de forma parabólica en todos los casos. Con la carga, sin embargo, aunque se aprecia un cierto crecimiento, este es bastante más tenue y hay casos en los cuales aproximadamente no se produce aumento de la potencia espectral.

El aumento del valor de la potencia espectral con la carga es prácticamente inapreciable, mientras que el defecto en el anillo interno se denota cierto aumento.

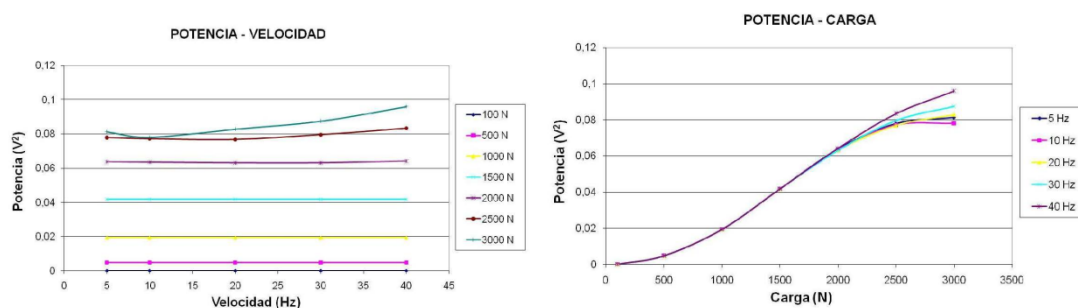
### **3.5. EVOLUCION DE LA POTENCIA ESPECTRAL TOTAL EN LAS SEÑALES SIMULADAS**

Vamos a mostrar las curvas de evolución de la potencia espectral con la velocidad de giro y con la carga para los análisis: modelo de 11GDL (rodamiento 9 bolas), sin defecto, con defecto en anillo externo, y con defecto en anillo interno.

Para construir cada gráfica es necesario procesar los datos originados a partir de las combinaciones de 7 cargas (100N, 500 N, 1000N, 1500N, 2000 N, 2500 N y 3000 N) con 5 velocidades (5 Hz, 10 Hz, 20 Hz, 30 Hz y 40 Hz).

Se observa que el comportamiento es diferente cuando existe defecto y cuando no existe defecto.

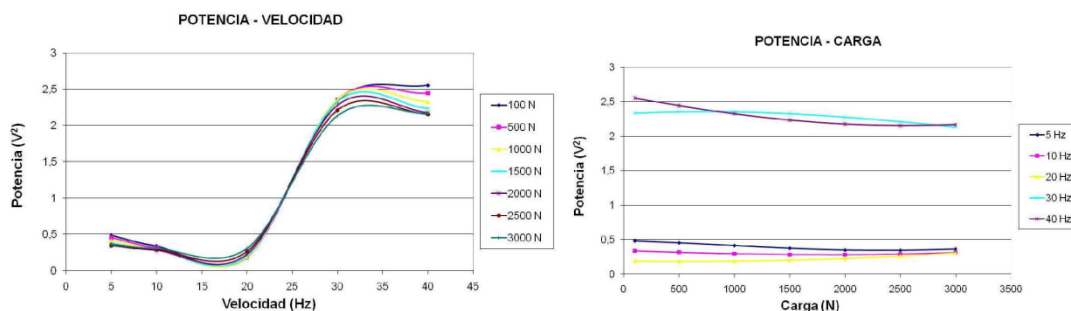
Cuando no existe defecto, el valor de la potencia espectral aumenta con la carga (figura 8.59), manteniéndose prácticamente constante o con cierto crecimiento cuando la velocidad es elevada.



**Figura 8.59.- Evolución de la Potencia Espectral con la velocidad de giro, para diferentes cargas y con la carga, para diferentes velocidades de giro.**

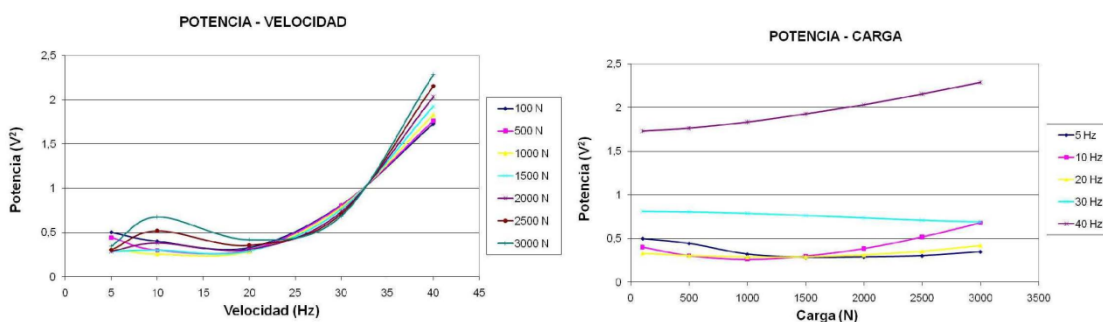
Cuando existe defecto en el anillo externo, la variación de la potencia espectral es más sensible a la velocidad que a la carga. La variación con la velocidad no sigue un patrón creciente como en el caso experimental, sino que la variación se produce bruscamente en la banda de frecuencias que va de los 20 Hz a 30 Hz.

La variación de la potencia con la carga en el modelo de 11 GDL y defecto en la pista exterior (Figura 8.60) sigue en general una tendencia constante o débilmente decreciente.



**Figura 8.60.- Evolución de la Potencia Espectral con la velocidad de giro, para diferentes cargas y con la carga, para diferentes velocidades de giro.**

La variación de la potencia con la velocidad en el modelo de 11 GDL y defecto en la pista interior (Figura 8.61) presenta un claro crecimiento a partir de los 20 Hz con cierta similitud al caso experimental. Hasta los 20 Hz, el comportamiento es bastante regular. La variación de la potencia espectral con la carga no sigue un patrón determinado, presentándose incrementos, como en el caso de 40 Hz, decrementos como el caso de 30 Hz, y tanto decrementos como incrementos como el caso de 10 Hz.



**Figura 8.61.- Evolución de la Potencia Espectral con la velocidad de giro, para diferentes cargas y con la carga, para diferentes velocidades de giro.**

#### 4. CONCLUSIONES

En esta serie se ha logrado la validación de los modelos de rodamientos mediante el contraste de la señal generada al resolver el sistema de ecuaciones no lineal con la señal obtenida de los ensayos experimentales. Para ello se ha realizado el análisis y comparación en el dominio del tiempo, dominio de la frecuencia y dominio tiempo-frecuencial (wavelet), siendo especialmente significativo el espectro de la envolvente.

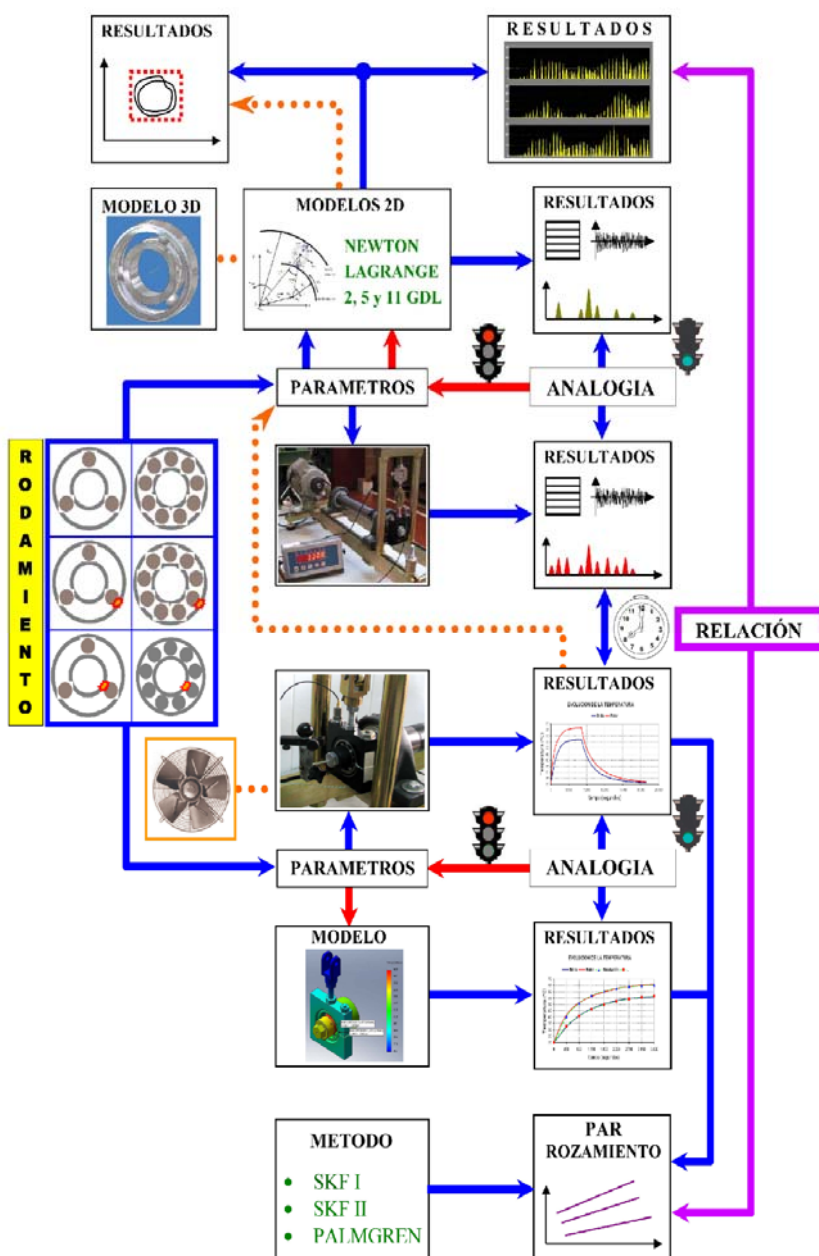


Figura 8.62.- Diagrama de bloques del desarrollo de la tesis.

La Figura 8.62 muestra un diagrama donde se indica la secuencia seguida en el desarrollo de esta tesis: aplicación de las técnicas utilizadas para modelar elementos mecánicos, resolver las ecuaciones de los modelos, obtener las señales (vibratoria y térmica) mediante ensayos experimentales, la metodología para analizar la señal vibratoria obtenida de dicha simulación dinámica y analizar el par de rozamiento mediante las medidas de temperatura en el rotor y la brida.

Para realizar los ensayos experimentales se ha desarrollado un banco universal de pruebas de rodamientos, con el sistema de medida correspondiente.

Una de las principales aportaciones de esta tesis consiste en presentar seis modelos analíticos dinámicos de rodamientos, originales y adaptados a las dimensiones del rodamiento comercial SKF 6206. En todos los modelos presentados cabe la posibilidad de incluir un defecto en el anillo interno, defecto en el anillo externo o defecto en ambos anillos simultáneamente.

Los modelos presentados son los siguientes:

1. Modelo de rodamiento con 2 GDL (3 bolas), mediante las ecuaciones de Newton.
2. Modelo de rodamiento con 2 GDL (9 bolas), mediante las ecuaciones de Newton.
3. Modelo de rodamiento con 5 GDL (3 bolas), mediante las ecuaciones de Newton.
4. Modelo de rodamiento con 5 GDL (3 bolas), mediante las ecuaciones de Lagrange.
5. Modelo de rodamiento con 11 GDL (9 bolas), mediante las ecuaciones de Newton.
6. Modelo de rodamiento con 11 GDL (9 bolas), mediante las ecuaciones de Lagrange.

En el capítulo de resultados se puede apreciar una alta correlación de las señales vibratorias generadas por los modelos cuando se han simulado situaciones donde el rodamiento presenta defectos en alguna de sus pistas de rodadura y la señal vibratoria experimental obtenida en el banco de ensayos ante el mismo estado de fallo. Las señales obtenidas en simulación con modelo de rodamiento que incluye un defecto, presentan todas las características que se describen en la literatura, tales como frecuencias de fallo características, BPFE y BPFI, armónicos de estas frecuencias o bandas laterales.

## **5. OTRAS APORTACIONES**

El objetivo principal de esta tesis es la propuesta y desarrollo de un modelo analítico avanzado que nos permita obtener los parámetros cinemático-dinámicos de un rodamiento a bolas en un sistema mecánico realista. Para ello, se ha modelado un rodamiento de bolas mediante técnicas newtonianas y lagrangianas contemplando la posibilidad de incluir diferentes geometrías y parámetros mecánicos, en particular: presencia de defectos en los caminos de rodadura, cálculo y análisis del par de rozamiento en el rodamiento, estudio y análisis del régimen transitorio de las vibraciones y la temperatura desde arrancada.

El modelo propuesto da lugar a un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales, y ha sido resuelto utilizando el código Matlab-Simulink como caso característico de sistema no lineal. Se ha desarrollado una metodología donde se han integrado los parámetros geométricos, mecánicos y la influencia de la temperatura, para obtener señales periódicas similares a las reales. En la bibliografía especializada, este problema ha sido resuelto para valores muy alejados de los reales y con este modelo se ha conseguido conjugar parámetros de entrada realistas (masas, amortiguamiento, rigideces, etc.) con sus correspondientes soluciones periódicas próximas al comportamiento real validadas posteriormente.

En este trabajo se obtiene, de forma experimental, mediante ensayos de impacto, el valor del coeficiente de amortiguamiento en los rodamientos, que posteriormente se utiliza en las ecuaciones de los modelos y cuyos resultados se alejan de los sugeridos por la literatura clásica, ampliamente utilizados desde entonces. El amortiguamiento es un parámetro muy importante en el modelo de simulación.

Se realizaron, mediante equipos de laboratorio de medida de temperatura y vibraciones, las medidas experimentales de vibraciones y de las temperaturas de varios puntos del sistema mecánico y temperatura ambiente, según distintos montajes y para varios estados de funcionamiento. Estos ensayos han permitido validar los modelos, contrastando las señales experimentales con los resultados obtenidos de las simulaciones.

Además, se ha propuesto un modelo térmico cuyas dimensiones y comportamiento se ajustan al sistema brida-rodamiento-rotor del banco de ensayos utilizado en la medida de vibraciones. Los parámetros no dimensionales del modelo son ajustados de forma iterativa utilizando los valores obtenidos en los ensayos experimentales a través de las curvas de evolución térmica (calentamiento y enfriamiento), tal y como se indica en la Figura 8.63.

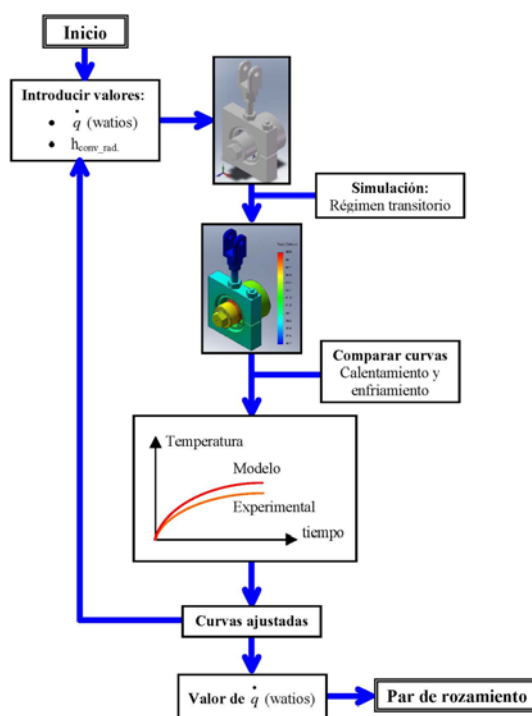


Figura 8.63.- Secuencia seguida en la simulación térmica.

## 6. FUTUROS DESARROLLOS

Como líneas futuras se proponen las siguientes evoluciones o mejoras:

- Realizar un análisis de estabilidad de los modelos para establecer zonas de convergencia y zonas donde es posible realizar simulaciones utilizando datos realistas.
- Realizar un interface mediante la herramienta GUI (Graphical User Interface) del software Matlab, de tal forma que se facilite la introducción o modificación de los parámetros más representativos utilizados en las simulaciones, gráficas de resultados e incluso método de simulación.
- Obtener, a partir de las soluciones de los modelos, una representación gráfica del rodamiento donde se muestren los elementos móviles del mismo, como bolas o anillo interno-rotor en movimiento, pudiendo variar la velocidad de la simulación, donde queden además resaltados aquellos puntos en los que se producen los impactos y, también se indique el valor de las fuerzas de contacto.
- Obtener mediante ensayos vibratorios y modelo de comportamiento vibro-térmico la localización de la posición del defecto cuando este se encuentre en la pista de rodadura del anillo externo (posición invariable durante el funcionamiento del rodamiento)
- Realizar las medidas de la evolución térmica en condiciones de refrigeración forzada en lugar de convección natural e incluso con fuente de lubricación.



## **TEMA 9 :**

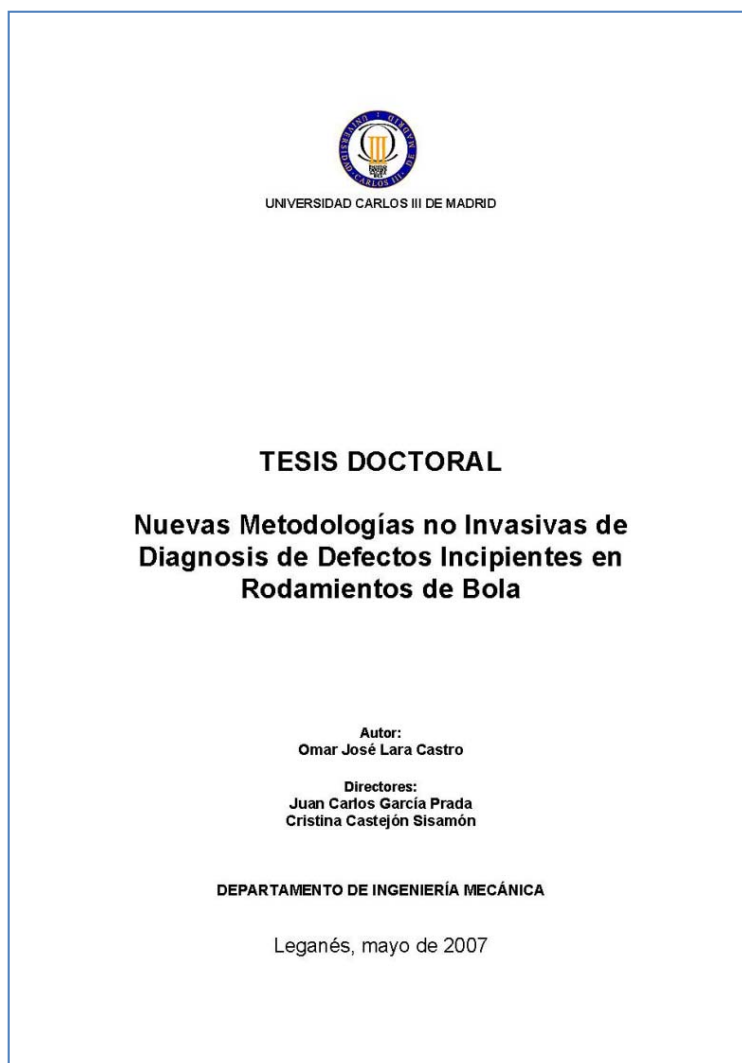
### **TESIS DOCTORAL DE OMAR JOSÉ LARA CASTRO**







Otra tesis doctoral con la que vamos a trabajar pertenece a Omar José Lara Castro. El título de la misma es: “Nuevas metodologías no invasivas de diagnóstico de defectos incipientes en rodamientos de bola”. Está fechada en Mayo 2007.



Está fechada en Mayo 2007, y en ella se desarrollan las redes neuronales para la caracterización de los defectos en rodamientos.

## **1. CONDICIONES DE MEDICIÓN Y RODAMIENTOS UTILIZADOS**

### RODAMIENTOS

Los rodamientos empleados para los ensayos de medida han sido del tipo FAG 7206 B.

### DEFECTOS

Se han obtenido cuatro tipos de condiciones o “clases” del sistema experimental:

- (i) Rodamientos en condiciones normales (N).
- (ii) Rodamientos con defecto en pista interna (I). *Espesor: 2mm.*
- (iii) Rodamientos con defecto en bola (B). *Múltiples ralladuras*
- (iv) Rodamientos con defecto en pista externa (E). *Espesor: 5 mm.*

### BANCO DE ENSAYOS

La adquisición de señales vibratorias ha sido realizada en un banco de ensayos con un motor eléctrico trifásico, y que recibe cargas radiales y axiales de 3 y 2,5 bar respectivamente, a través de dos cilindros neumáticos.



**Figura 9.1.- Banco de ensayos.**



## CONDICIONES DE MEDICIÓN

El proceso de ensayos se ha realizado en 196 rodamientos, incluyendo 49 rodamientos por cada condición en particular.

Se han tomado medidas para tres velocidades de rotación del eje del rodamiento: 600 rpm (10 Hz), 1200 rpm (20 Hz) y 1800 rpm (30 Hz), controladas mediante un tacómetro óptico.

Cada uno de los rodamientos ha sido ensayado 20 veces, formando la misma cantidad de subgrupos de ensayo, y un total de 3920 señales.

Condición	Cantidad de Rodamientos	Subgrupos de ensayo	Total (señales)
Normales	49	20	980
Defecto en Pista Interna	49	20	980
Defecto en Bola	49	20	980
Defecto en Pista Externa	49	20	980
Total	196		3920

Tabla 9.1.- Organización de los ensayos en subgrupos.

Por razones asociadas al diseño de clasificadores inteligentes, se establece una longitud de la señal igual a 256 datos, para todas las pruebas.

Aunque esa longitud de señal a 600 RPM no permite que se registren un giro completo (se necesitarían al menos 500 datos), aporta información relevante acerca del fenómeno en estudio. Para registrar una vuelta a una velocidad de 1200 RPM, basta con 250 datos, y para 1800 RPM, es suficiente con tener 167 datos.

$\omega$ (RPM)	$\omega$ (Hz)	$N_m$	$N^\circ$
600	10	256	0.512
1200	20	256	1.024
1800	30	256	1.536

Tabla 9.2.- Número de revoluciones totales registradas para cada señal de 256 datos.

Con los datos obtenidos, se van a formar tres grupos: el grupo de datos G1 consta de 15 rodamientos de cada condición o clase; el grupo de datos G2 posee 35 rodamientos; y el grupo G3, 49 rodamientos en total.

	Grupo G1	Grupo G2	Grupo G3
Nº de señales	1200	2800	3920
Nº de rodamientos	60	140	196

Tabla 9.3.- Número de rodamientos y señales en cada uno de los grupos formados.

## 2. TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO

En el presente trabajo se parte de la adquisición de las señales experimentales del banco de ensayo de rodamientos, su procesamiento con el Análisis Multirresolución (MRA), selección de los patrones característicos, hasta la clasificación final con diferentes tipologías de red neuronal (MLP, RBF y PNN). En la Figura se muestra un diagrama general de los resultados experimentales, en donde los cuadros representan la fase metodológica, y las circunferencias representan los resultados experimentales obtenidos.

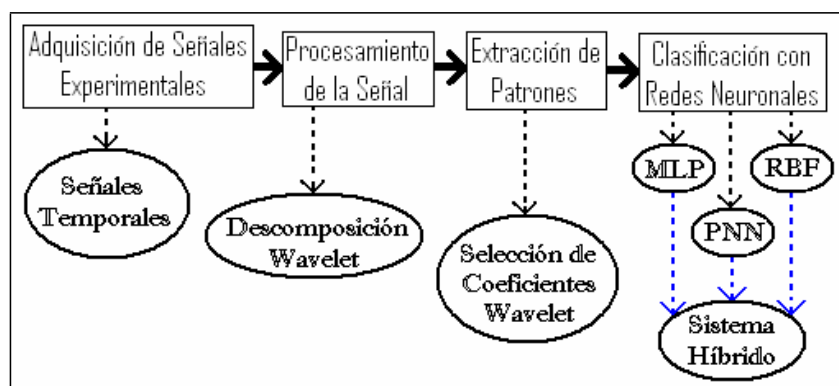


Figura 9.2.- Diagrama general de los resultados experimentales.

Una vez completado el proceso de adquisición de medidas vibratorias, es preciso plantear el procedimiento de procesamiento de señales, que se aborda mediante el Análisis Wavelet, y que persigue la extracción de patrones en la señal. Para la aplicación de la Transformada Wavelet Discreta (DWT), ha sido utilizado el programa MATLAB®, que proporciona los códigos para la ejecución del Análisis Multirresolución (MRA), que genera la Descomposición Wavelet.

La aplicación de este tipo de análisis genera vectores de coeficientes Wavelet para cada señal estudiada, a diferentes niveles de descomposición. Tales coeficientes se consideran “patrones” de las señales en cuestión, y pueden servir de entrada a una red neuronal para su clasificación posterior.

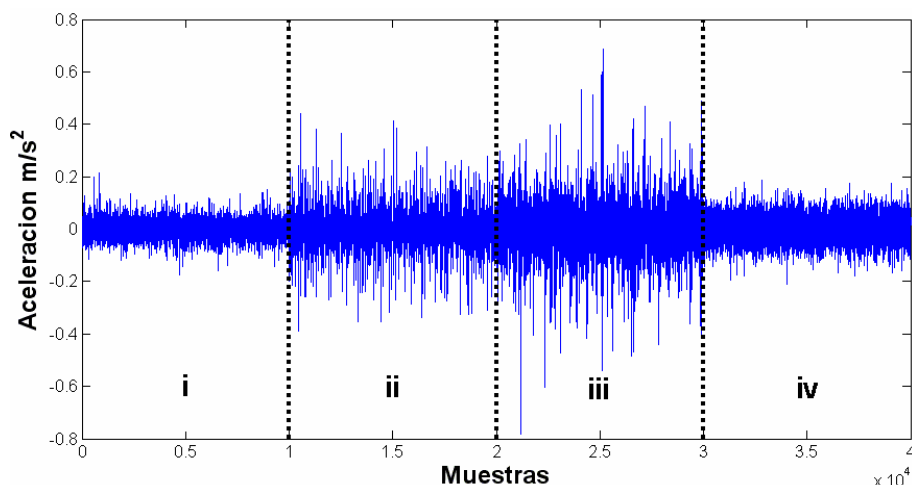
### **3. ENSAYOS REALIZADOS**

Partimos de las señales temporales, obtenidas experimentalmente en el banco de ensayos, y vamos a visualizar las diferencias de acuerdo a la presencia o no de defectos en los rodamientos estudiados.

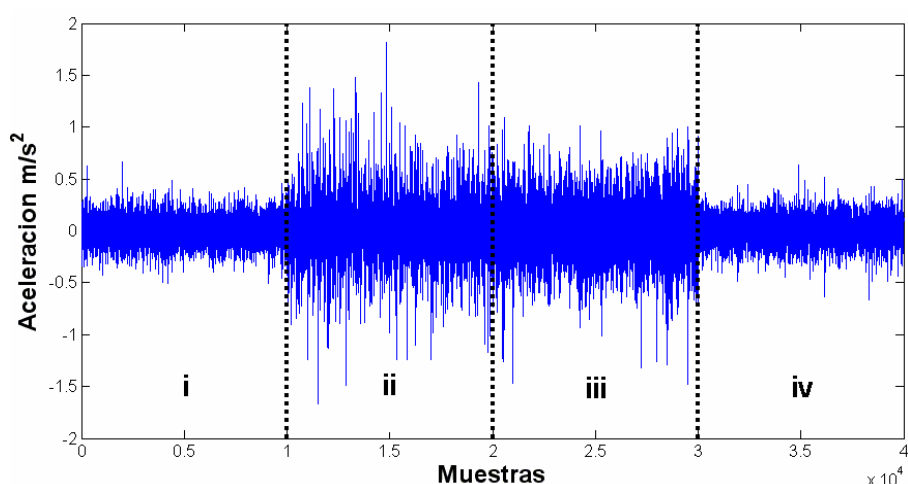
Cada una de estas imágenes se divide en cuatro cuadrantes:

- (i), Primer cuadrante: señal de un rodamiento sin defecto o en estado “Normal”.
- (ii), Segundo cuadrante: señal correspondiente a un rodamiento con defecto en su pista interna.
- (iii), Tercer cuadrante: señal de un rodamiento con defecto en una de sus bolas.
- (iv), Cuarto cuadrante: señal correspondiente a un rodamiento con defecto en su pista externa.

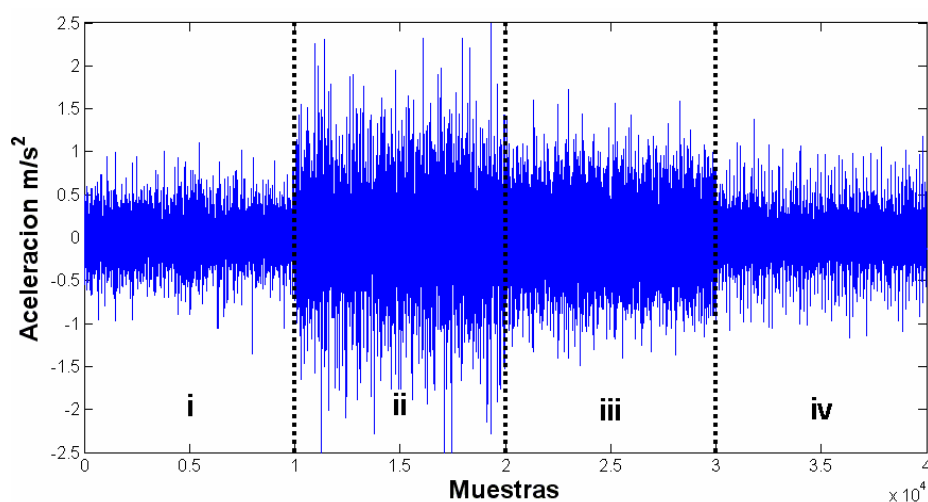
Las figuras obtenidas a cada velocidad es la siguiente:



**Figura 9.3.- Señales temporales de cada condición estudiada a 600 RPM (i) normal, (ii) def. pista interna, (iii) def. bola, (iv) def. pista externa.**



**Figura 9.4.- Señales temporales de cada condición estudiada a 1200 RPM (i) normal, (ii) def. pista interna, (iii) def. bola, (iv) def. pista externa.**



**Figura 9.5.- Señales temporales de cada condición estudiada a 1800 RPM (i) normal, (ii) def. pista interna, (iii) def. bola, (iv) def. pista externa.**

La señal de un rodamiento sin defecto, o en estado “Normal” (primer cuadrante), presenta la menor amplitud de todas las señales representadas, aunque similar a la ubicada en el cuarto cuadrante, correspondiente al rodamiento con defecto en pista externa, de la cual llega a diferenciarse sólo a 600 RPM.

En el segundo cuadrante se presenta la señal correspondiente a un rodamiento con defecto en su pista interna, y cuya amplitud resulta ser la mayor de todas las señales a 1200 y 1800 RPM.

Para el tercer cuadrante, las señales de un rodamiento con defecto en bola, llega a ser la señal de mayor amplitud a 600 RPM, y supera en amplitud a las señales correspondientes a defecto en pista externa y condición normal para todas las velocidades de giro.



### 3.1. ANÁLISIS WAVELET (DWT-MRA)

Posteriormente al acondicionamiento de la señal, es necesario realizar un procesamiento de la señal para extraer los rasgos característicos que permitan diferenciarlas entre sí. Este procesado está basado en los fundamentos teóricos de la descomposición Wavelet, que proporciona el Análisis Multirresolución, desarrollando los algoritmos de análisis y síntesis en el entorno MATLAB®.

Aunque la experiencia en trabajos anteriores demuestran que los resultados no presentan una variabilidad alta según la elección de una u otra Wavelet madre ortonormal para la implementación de la DWT-MRA, se ha seleccionado el nivel 5 de descomposición y la Wavelet madre Daubechies 6 (db6), dada su condición de ortonormalidad, y amplio uso en estudios relacionados.

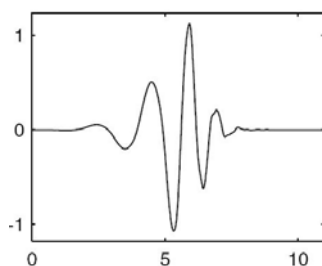


Figura 9.6.- Wavelet Daubechies 6.

El resultado de la aplicación del procedimiento es la descomposición de la señal original en distintas señales, que están representadas a través de coeficientes Wavelet y que comprenden varias bandas de frecuencia.

Coeficientes	Reconstrucción Parcial	Banda de Frecuencia (Hz)
<i>Coeficientes de Detalle 1</i> (Dc <sub>1</sub> )	<i>Señal de Detalle 1</i> (D <sub>1</sub> )	1250-2500
<i>Coeficientes de Detalle 2</i> (Dc <sub>2</sub> )	<i>Señal de Detalle 2</i> (D <sub>2</sub> )	625-1250
<i>Coeficientes de Detalle 3</i> (Dc <sub>3</sub> )	<i>Señal de Detalle 3</i> (D <sub>3</sub> )	312,5-625
<i>Coeficientes de Detalle 4</i> (Dc <sub>4</sub> )	<i>Señal de Detalle 4</i> (D <sub>4</sub> )	156,25-312,5
<i>Coeficientes de Detalle 5</i> (Dc <sub>5</sub> )	<i>Señal de Detalle 5</i> (D <sub>5</sub> )	78,125-156,25
<i>Coeficientes de Aproximación 5</i> (Ac <sub>5</sub> )	<i>Señal de Aproximación 5</i> (A <sub>5</sub> )	0-78,125

Tabla 9.4.- Bandas de Frecuencia para la descomposición Wavelet de nivel 5 de una señal muestreada a 5000 Hz.

Estos coeficientes pueden someterse a un proceso de síntesis a través de bancos de filtros, dando lugar a señales parcialmente reconstruidas (D1, D2, D3, D4, D5 y A5), que se ubican en el mismo rango de frecuencia de los coeficientes.

En las siguientes figuras se presenta una comparación entre las distintas reconstrucciones parciales en diferentes bandas de frecuencia, para señales del conjunto de muestras de rodamientos normales y defectuosos, a las tres diferentes velocidades de rotación estudiadas, lo que permite realizar una identificación visual y verificar algunas diferencias cualitativas y cuantitativas entre las señales originales a nivel temporal, que se muestran en la parte superior de la figura, y entre diferentes niveles de frecuencia, a través de las reconstrucciones parciales de la señal original.

#### A 600 rpm:

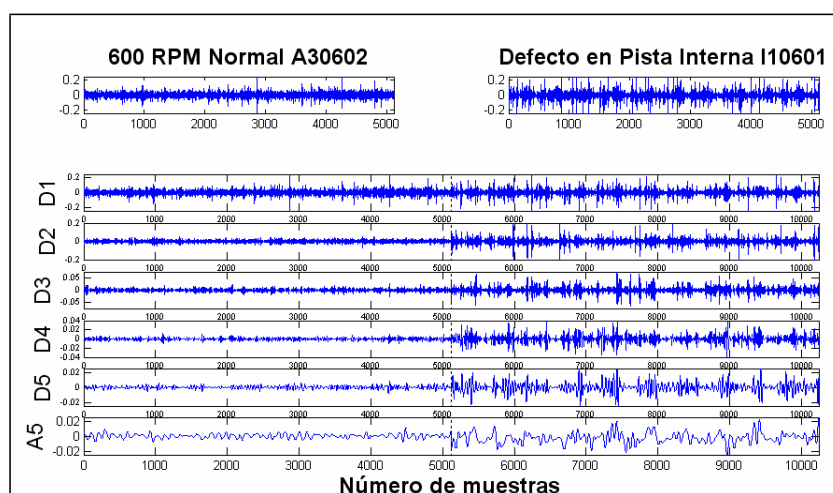


Figura 9.7.- Comparación de la descomposición Wavelet de nivel 5 de un Rodamiento sin defecto y otro con defecto en su pista interna para 600 RPM.

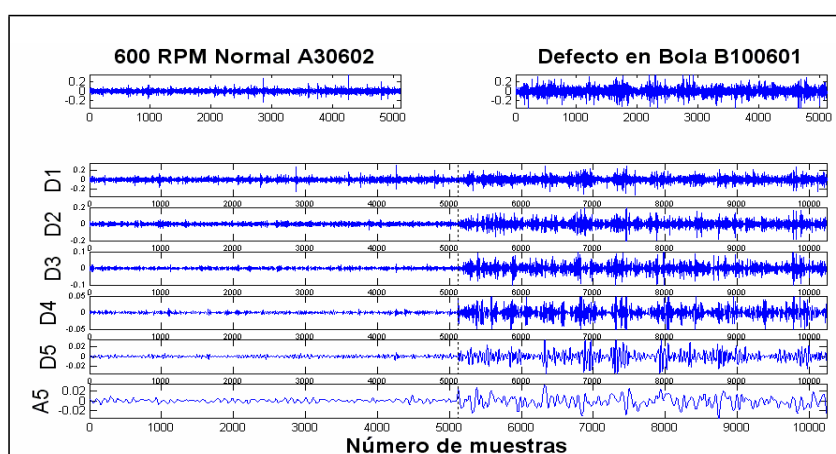


Figura 9.8.- Comparación de la descomposición Wavelet de nivel 5 de un Rodamiento sin defecto y otro con defecto en bola para 600 RPM.

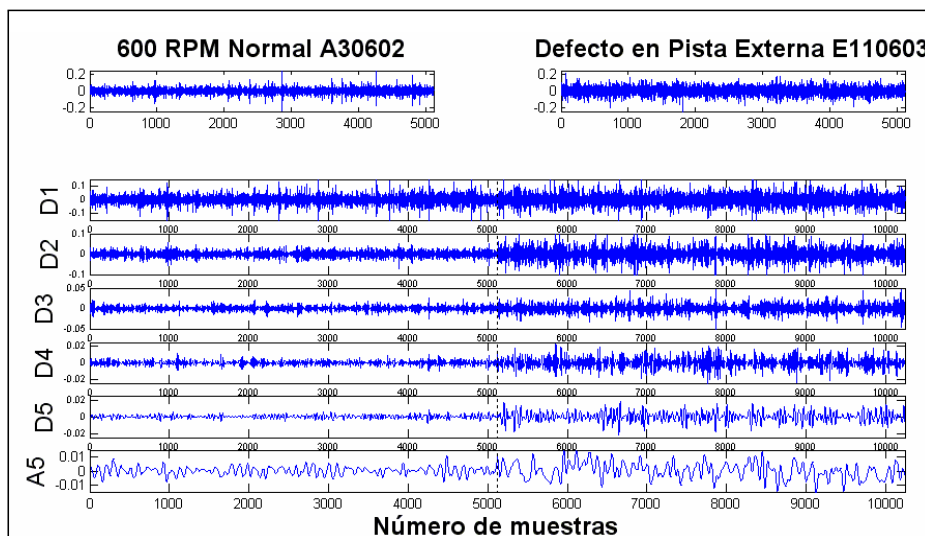


Figura 9.9.- Comparación de la descomposición Wavelet de nivel 5 de un Rodamiento sin defecto y otro con defecto en su pista externa para 600 RPM.

En todos los niveles de descomposición existen diferencias notables de forma y amplitud de las señales consideradas, lo que confirma que la DWT-MRA es capaz de extraer información de las señales en estudio, al separar diferentes bandas de frecuencia del espectro general de la señal.

De manera general, un rodamiento defectuoso presenta picos de amplitud mayores que los de un rodamiento normal, en todos los niveles de descomposición. Cabe destacar que, a medida que aumenta el nivel de descomposición, la señal presenta mayor claridad en los impulsos vibratorios, lo que se verifica en señales como D5 ó D4.

#### A 1200 rpm:

Las figuras correspondientes a los rodamientos normales y con defecto de bola y en pista interna a 1200 RPM, presentan una forma de onda similar a la de las señales adquiridas a 600 RPM, aunque superan entre cuatro y diez veces la amplitud de sus picos.

De las figuras para un rodamiento normal y con defecto en pista externa, se verifica que los picos de las señales superan entre dos y cinco veces la amplitud de los picos de las señales análogas a 600 RPM. Esto indica que el comportamiento del rodamiento al doble de la velocidad de rotación es altamente no-lineal en las diferentes bandas de frecuencia, ya que no presenta una variación proporcional en amplitud de vibración.

**A 1800 rpm:**

Para las señales normales y con defecto en pista interna, las señales adquiridas a 1800 RPM presentan una forma similar a las anteriores, aunque tienen una amplitud que duplica a las señales análogas adquiridas a 1200 RPM. Adicionalmente, el comportamiento que se observa en las bandas de frecuencia resulta desordenado, ya que en algunas bandas como D3, se mantienen aproximadamente constantes las amplitudes de los picos. En el resto de bandas de frecuencia, la diferencia se incrementa hasta un máximo de tres veces, a favor de los rodamientos ensayados a mayores RPM.

La figura que presenta las señales adquiridas a 1800 RPM, correspondientes a un rodamiento normal y a un rodamiento con defecto en bola, se verifica que el rodamiento con defecto en bola no presenta mayor variación en la señal original, en relación a la señal adquirida a 1200 RPM. Sin embargo, la amplitud de los picos de las señales reconstruidas parcialmente, presentan una variación de hasta el doble de las señales análogas a 1200 RPM, excluyendo casos en que permanece relativamente constante, como D2 y D4.

Por último, en la figura que relaciona una señal de un rodamiento normal, y otro con defecto en su pista externa, a una velocidad de 1800 RPM, no muestra una diferencia significativa entre las señales originales, mostradas en la parte superior. Sin embargo, se verifica que la señal correspondiente al defecto en pista externa presenta mayor cantidad de impulsos vibratorios, originados por la continua interacción de los elementos rodantes con el defecto en la pista externa del rodamiento. En cuanto a la forma de onda, el comportamiento en las bandas de frecuencia es similar al presentado por las señales análogas a 1200 RPM, aunque los impulsos vibratorios se destacan mejor a una mayor velocidad del rodamiento, superando hasta dos veces la amplitud en la mayoría de los niveles.

**3.2. SELECCIÓN DE PATRONES**

Los patrones o “rasgos característicos” que presenta cada condición del rodamiento son la base del proceso de clasificación que se realiza a posteriori. Por este motivo, tales patrones han de tener características apreciablemente diferenciadas entre sí, logrando de esta forma caracterizar al defecto o condición.

La información de cada defecto en particular depende del resultado de la aplicación de la DWT-MRA, y se descompone en diferentes bandas de frecuencia. Con este esquema, es complicado trabajar con diferentes bandas de frecuencia a la vez, ya que la cantidad de

información que se maneja es muy alta y el sistema no responde adecuadamente. Por tanto, es preciso seleccionar aquella banda de frecuencia que presente una buena diferenciación, y que proporcione una cantidad de datos aceptable.

Para definir una longitud de datos óptima para la clasificación, es preciso aclarar que no todos los niveles de descomposición presentan la misma cantidad de coeficientes.

En la Tabla se detallan las BCF correspondientes a los rodamientos utilizados para el estudio:

Frecuencia de Defecto	Velocidad de giro (RPM)		
	600	1200	1800
<b><i>BPFI</i></b>	44,02	88,05	132,07
<b><i>BPFO</i></b>	85,98	171,95	257,93
<b><i>BSF</i></b>	18,51	37,03	55,54

Tabla 9.5.- Frecuencias de defecto en pista externa, interna y bola para el rodamiento FAG 7206B a 600,1200 y 1800 RPM de ensayos.

Al comparar la Tabla 9.5 con la Tabla 9.4, se observa que no es posible que las tres frecuencias características coexistan en uno de los rangos de frecuencia resultantes de la descomposición Wavelet para una velocidad de giro dada. Aunque, haciendo un resumen del número de apariciones de cada banda, se puede construir la Tabla 9.6.

Frecuencia de Defecto	Velocidad (RPM)		
	600	1200	1800
<b><i>BPFI</i></b>	A <sub>5</sub>	D <sub>5</sub>	D <sub>5</sub>
<b><i>BPFO</i></b>	D <sub>5</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>
<b><i>BSF</i></b>	A <sub>5</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>5</sub>

Tabla 9.6.- Bandas de frecuencia que contienen a las frecuencias de defecto en pista externa, interna y bola a 600, 1200 y 1800 RPMs.

Las tres bandas presentes en la tabla (A<sub>5</sub>, D<sub>5</sub> y D<sub>4</sub>), están bastante diferenciadas entre sí, por lo que a nivel visual las tres son aptas para generar un vector característico. Ahora bien, A<sub>5</sub> puede presentar en su espectro algún ruido, como la frecuencia característica del sistema eléctrico nacional español (50 Hz), y D<sub>4</sub> maneja mayor número de datos, 26 datos en lugar de los 18 que tiene el nivel de detalle siguiente (D<sub>5</sub>).

Por lo tanto, se toman como vectores característicos aquellos coeficientes derivados de la descomposición Wavelet en el nivel de detalle 5 (Dc5), y que serán utilizados como entrada de las tres redes neuronales clasificadoras.

En las figuras siguientes se presentan algunas muestras de los coeficientes (Dc5) a las velocidades de rotación estudiadas.

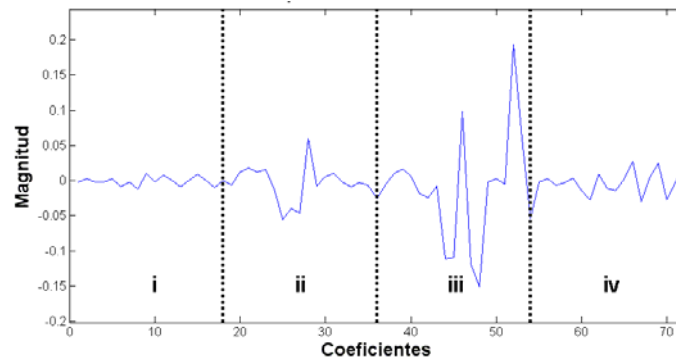


Figura 9.10.- Coeficientes de detalle 5 (Dc5) para cada condición estudiada a 600 RPM. (i) normal, (ii) def. pista interna, (iii) def. bola, (iv) def. pista externa.

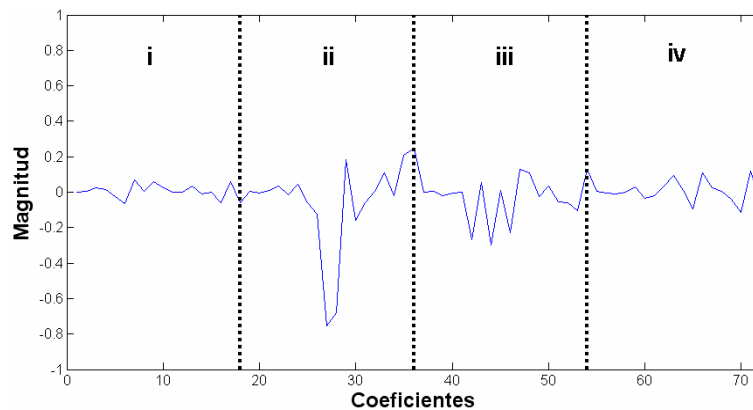


Figura 9.11.- Coeficientes de detalle 5 (Dc5) para cada condición estudiada a 1200 RPM. (i) normal, (ii) def. pista interna, (iii) def. bola, (iv) def. pista externa.

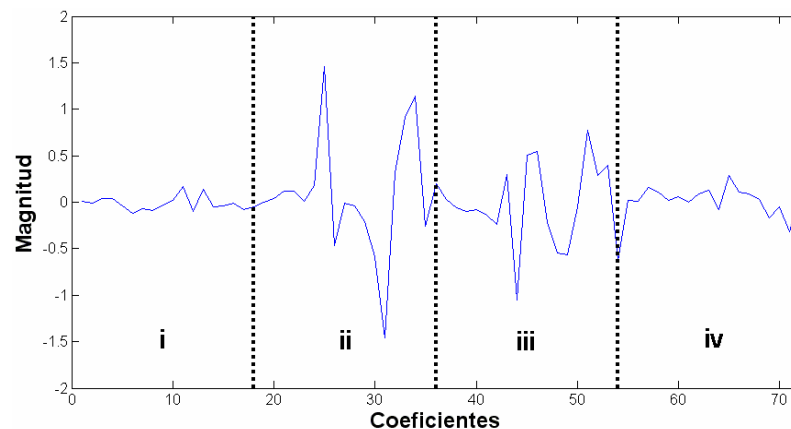


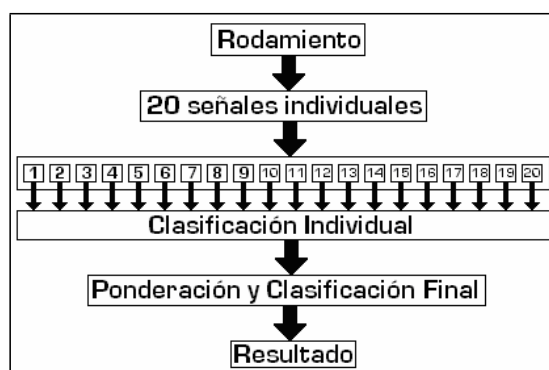
Figura 9.12.- Coeficientes de detalle 5 (Dc5) para cada condición estudiada a 1800 RPM. (i) normal, (ii) def. pista interna, (iii) def. bola, (iv) def. pista externa.

### **3.3. DIAGNOSIS DE LA CONDICIÓN DE RODAMIENTOS MEDIANTE REDES NEURONALES**

Una vez culminado el proceso de extracción de patrones, es preciso complementar el procedimiento con diferentes técnicas de clasificación inteligente. Se va a abordar la aplicación de ANN de tipo Perceptron Multicapa (MLP), Base Radial (RBF) y Probabilísticas (PNN).

Como ya se ha mencionado, se han tomado 20 mediciones de cada rodamiento, completando 20 señales de una longitud de 256 muestras cada una. Se introducirán consecutivamente 20 vectores característicos de un rodamiento dado en la red neuronal, lo cual genera 20 diagnósticos ó clasificaciones individuales, que según un proceso matemático de mayoría simple, generan la clasificación final o resultado absoluto del rodamiento dado.

Este enfoque utilizado para clasificar la condición del rodamiento, se detalla en la figura.



**Figura 9.13.- Diagrama de diagnosis de defecto para cada rodamiento.**

El proceso de clasificación final tiene como base a las redes neuronales entrenadas que presentan un mejor rendimiento. En el último paso en el que se decide cual es la condición final del rodamiento, estará dada por la condición que más se repita de todos los diagnósticos individuales; es decir, la tasa final de éxito se mide por rodamiento clasificado correctamente, y no por cada señal en particular. Esta forma característica de operación, hace que la red sea más robusta y que puedan detectarse fases de cambio entre una condición y otra del rodamiento.



### 3.3.1. REDES MLP

La arquitectura de redes MLP se caracteriza porque cada neurona de salida está conectada en cascada a todas las de la capa anterior, y no admite conexiones entre neuronas de la misma capa. La capa de entrada solamente recibe las señales del exterior, las capas ocultas realizan un procesamiento no lineal de los patrones recibidos, y la última capa actúa como salida.

#### Diseño de la arquitectura de red

Se debe fijar las funciones de red y activación, y el número de neuronas y capas de la red.

La función de red lineal es la más utilizada en arquitecturas de redes MLP, mientras que la función de activación sigmoide de tangente hiperbólica proporciona una suavidad en la salida de la neurona, evitando un resultado abrupto a mitad del proceso de aprendizaje.

Respecto al número de capas, el enfoque común es el de prueba y error, sin embargo, se ha demostrado que una red MLP de tres capas (una capa de entrada, una capa oculta y una capa de salida), es capaz de aprender complicadas funciones no lineales.

El número de neuronas en la capa de entrada, se suele tomar la longitud de los vectores característicos o patrones de entrada, que en este caso corresponde a 18. La capa de salida se compone del número total de condiciones a clasificar o los posibles estados del sistema, que son 4 (rodamiento normal, con defecto en pista interna, con defecto en pista externa, con defecto en bola). Con respecto al número de neuronas en la capa oculta, se efectúan pruebas con 10, 20 y 30 neuronas para cada caso.

Parámetros	Selección		
<i>Función de red</i>	Lineal		
<i>Función de activación</i>	Capa oculta	Capa de salida	
	Sigmoide de Tangente Hiperbólica	Sigmoide de Tangente Hiperbólica	
<i>Número de capas</i>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 1 entrada</li><li>• 1 oculta</li><li>• 1 salida</li></ul>		
<i>Número de neuronas</i>	Capa de entrada	Capa oculta	Capa de salida
	18	10, 20 y 30	4

Tabla 9.7.- Diseño de la arquitectura de la red MLP utilizada.

### Diseño del Entrenamiento de la red MLP

Algoritmo	Fórmula General de $\Delta W(n)$	Comentarios
<b>Gradiente de paso descendente</b>	$-\alpha g(n) = -\alpha \frac{\partial e(n)}{\partial W}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>g</math> es el vector gradiente</li> <li>▪ <math>\alpha</math> es la tasa de aprendizaje</li> <li>▪ Es conocido como Retropropagación</li> </ul>
<b>Newton</b>	$-H^{-1} g(n) = -\left[ \partial^2 e(n) / \partial W^2 \right]^{-1} \partial e(n) / \partial W$	H es la matriz Hessiana
<b>Gradiente conjugado</b>	$\alpha Z(n) \quad \text{donde:}$ $Z(n) = -g(n) + \beta Z(n-1)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>\beta</math> depende de la variante del algoritmo<sup>89</sup></li> </ul>

Tabla 9.8.- Algoritmos de optimización iterativa no lineal de redes MLP.

En las redes tipo MLP, se utiliza generalmente un algoritmo de minimización del error, denominado búsqueda del gradiente negativo de la función E, o método de gradiente de paso descendente, que generalmente consigue una convergencia más rápida en el entrenamiento. En este caso se realiza a través de la función sigmoide de tangente hiperbólica, que tiene un mayor rendimiento con respecto a la rapidez del entrenamiento

### Parámetros de entrenamiento de la red MLP

Los parámetros de entrenamiento son mayoritariamente valores numéricos que relacionan al algoritmo de entrenamiento con la estructura de la red neuronal.

	Grupo G1	Grupo G2	Grupo G3
<b>Nº de señales</b>	1200	2800	3920
<b>Nº de rodamientos</b>	60	140	196

Tabla 9.9.- Longitud de datos disponibles para los diferentes grupos de datos.

La longitud de los subgrupos de datos se define a través de porcentajes del total de datos. De esta forma, al subgrupo de entrenamiento se le asigna un 50%, al grupo de validación otro 25%, y finalmente, el grupo de prueba comprende el 25% restante de datos.

La sigmoide de tangente hiperbólica se utiliza como función de activación en todas las capas de la red, y su rango es  $[-1, 1]$ . Para la ejecución del entrenamiento, resulta complicado alcanzar la convergencia en valores límite de la función de activación, por lo que se suele disminuir un porcentaje de tal límite para establecer la salida esperada de la red. En este caso, los valores límite han sido disminuidos un 10%, alcanzando un valor de 0,9 ó -0,9, según cada caso en particular.



<b>Condición 1 (N)</b>	[-0.9 -0.9 -0.9 0.9]	Rodamiento normal
<b>Condición 2 (I)</b>	[-0.9 -0.9 0.9 -0.9]	Rodamiento con defecto en pista interna
<b>Condición 3 (B)</b>	[-0.9 0.9 -0.9 -0.9]	Rodamiento con defecto en pista externa
<b>Condición 4 (E)</b>	[0.9 -0.9 -0.9 -0.9]	Rodamiento con defecto en bola

Tabla 9.10.- Valores numéricos de la salida objetivo o salida esperada.

Basados en estos criterios netamente experimentales y otros trabajos realizados por otros autores, se establece un valor de 0.06 como tasa de aprendizaje y 0.8 como coeficiente de momento, para la metodología basada en redes MLP. A partir de estos valores, el rendimiento de la red no se ve afectado, aunque el tiempo de entrenamiento pueda variar.

<b>Parámetros</b>	<b>Selección</b>	
<i>Normalización de los valores de entrada</i>	En el rango [-1; 1]	
<i>Distribución de las entradas de la red</i>	Entrenamiento	50 %
	Validación	25%
	Prueba	25%
<i>Tipo de aprendizaje</i>	Supervisado	
<i>Valores de la salida esperada</i>	Ver Tabla 5.5	
<i>Tasa de aprendizaje (<math>\alpha</math>)</i>	0.06	
<i>Coeficiente de momento (<math>\eta</math>),</i>	0.8	
<i>Inicialización de los pesos</i>	Aleatorio	
<i>Criterios de Parada</i>	Límite de iteraciones	25000
	MSE límite	10%
	Gradiente mínimo	1 E-15
	Máximo número de fallos	1000

Tabla 9.11.- Parámetros de diseño del entrenamiento de la red MLP.

De los entrenamientos se observa:

En algunos casos particulares existe un fenómeno denominado sobreaprendizaje o sobreajuste de los datos de entrenamiento, que se presenta en aquellos casos que la red aprende demasiado del conjunto de datos de entrenamiento y reduce la capacidad de generalizar con el conjunto de prueba. Por esta causa, existe un límite en el que el rendimiento de la red empieza a bajar, En este caso, los resultados en los conjuntos de validación y prueba de la red de 30 neuronas en su capa oculta, tienen menor tasa de éxito, que para la red de 20 neuronas en su capa oculta.



Al variar el número de neuronas de la capa oculta, y la longitud del número de datos, es posible deducir algunos tópicos de interés. En la Tabla 9.12, se presentan las redes MLP que han presentado mejor rendimiento, correspondientes a los grupos de datos G1, G2 y G3, a diferentes velocidades de giro.

Grupo de datos	Subgrupo	600 RPM	1200 RPM	1800 RPM	
<b>Grupo G1</b> <b>(60 rodamientos)</b>	<i>Neuronas en la capa oculta</i>	20	30	30	
	<i>Entrenamiento</i>	62.5%	64.67	61.17	
	<i>Validación</i>	51.33%	46.67	53	
	<i>Prueba</i>	53.66%	48.67	51	<b>51.11</b>
<b>Grupo G2</b> <b>(140 rodamientos)</b>	<i>Neuronas en la capa oculta</i>	20	30	30	
	<i>Entrenamiento</i>	63.29	63.86	60.14	
	<i>Validación</i>	57.71	53.43	52	
	<i>Prueba</i>	56.57	54.14	51.86	<b>54.19</b>
<b>Grupo G3</b> <b>(196 rodamientos)</b>	<i>Neuronas en la capa oculta</i>	30	20	30	
	<i>Entrenamiento</i>	63.06	63.93	61.07	
	<i>Validación</i>	58.98	55.10	52.86	
	<i>Prueba</i>	57.86	56.22	50.92	<b>55</b>

Tabla 9.12.- Redes MLP óptimas para diferentes grupos de datos y velocidades.

La tasa de éxito de cada uno de los grupos de datos es sensible a la velocidad de giro del eje del rodamiento durante la adquisición de las medidas. En este sentido, es posible comprobar que a bajas velocidades de giro, la clasificación es más acertada que a altas velocidades. Esto se debe a que a altas velocidades resulta más difícil a la red diferenciar unos patrones de otros, a causa del incremento del comportamiento caótico del sistema mecánico y del ruido presente.

Adicionalmente, se observa que la red se comporta mejor mientras mayor es la cantidad de información que maneja: para el grupo G1 presenta un comportamiento ligeramente menos acertado que para el grupo G2 o el grupo G3, que tienen una mayor cantidad de datos. Esto ocurre para las velocidades de giro de 600 y 1200 RPM, ya que a 1800 RPM la clasificación tiende a mantener su porcentaje de éxito.

Otro de los fenómenos que cabe distinguir, es que para el caso de las velocidades de 600 y 1200 RPM, se observa que las curvas de los tres subconjuntos se encuentran más alejadas en relación a la cantidad de datos que contienen. Esto se puede explicar en que mientras menos datos tenga la red para aprender, menor será el tiempo de entrenamiento; sin embargo, para redes con mayor cantidad de datos, el entrenamiento lleva más tiempo y la eficiencia que se reduce en el conjunto de datos de entrenamiento, se traduce en un aumento de la eficiencia de los grupos de prueba y validación, acercando de esta forma a las curvas.

Los mayores porcentajes de éxito se obtienen en el grupo G3, que es el que contiene mayor cantidad de datos, a bajas velocidades de rotación (600 RPM), y para redes con 30 neuronas en su capa oculta (alta complejidad), lo que hace pensar que una red de esta naturaleza puede ser la más apropiada para incrementar el índice de clasificación con redes MLP.

Por otra parte, otro dato importante es que la mayoría de las máximas tasas de éxito se obtienen de las redes con 30 neuronas en su capa oculta, lo que establece un vínculo a subrayar entre la complejidad de la red (mayor número de neuronas), y el éxito de la red. Para distinguir visualmente si una red ha “sobreaprendido”, basta con detallar si su evolución no es creciente; en tal caso, se dice que la red aprende demasiado del subconjunto de entrenamiento, y generaliza peor con el subconjunto de datos de prueba.

### **RESULTADOS MLP**

Según los parámetros de diseño presentados, se han diseñado 27 redes neuronales, según los datos de entrada (600, 1200 y 1800 RPM), el grupo de datos (G1, G2 y G3), y el número de neuronas en su capa oculta (10, 20 y 30).

En las siguientes tablas se presentan los resultados de la clasificación de la condición de rodamientos de bola, con la utilización de redes MLP, con los distintos parámetros estudiados. Los resultados están clasificados por tipo de defecto, velocidad de giro (RPM), y neuronas en la capa oculta.

RPM	Neuronas en capa Oculta	Normal	Defecto en Pista interna	Defecto en Bola	Defecto en Pista externa	Eficiencia de la red
600	10	100	13.33	100	60	68,33
	20	100	20	100	53.33	68,33
	30	100	40	100	66.67	76,67
1200	10	100	60	46.67	0	51,67
	20	100	53.33	66.67	13.33	58,33
	30	100	60	66.67	20	61,67
1800	10	100	86.67	53.33	0	60
	20	100	66.67	73.33	0	60
	30	100	93.33	73.33	26.67	73,33
Total G1						64.26 %

Tabla 9.13.- Efectividad en la clasificación de rodamientos del grupo G1 con redes MLP.

El grupo de datos G1 presenta un índice total de clasificación del 64.26 %. Las condiciones mejor clasificadas son el rodamiento normal para todas las velocidades, y el rodamiento en bola para 600 RPM, ambas con un 100%. Se observa que a medida que aumenta la complejidad de la red neuronal, se incrementa notablemente la tasa de éxito de la clasificación. El defecto en pista interna se detecta mejor a altas revoluciones y a medida que disminuye la velocidad, decrece la tasa de éxito de la clasificación. Por el contrario, el defecto en pista externa se detecta mejor a bajas RPM, y mientras se eleva la velocidad, baja el índice de éxito de la clasificación. Es importante destacar que el defecto en pista externa es mayoritariamente confundido por la red como una condición normal, tal como muestra la figura 9.14.

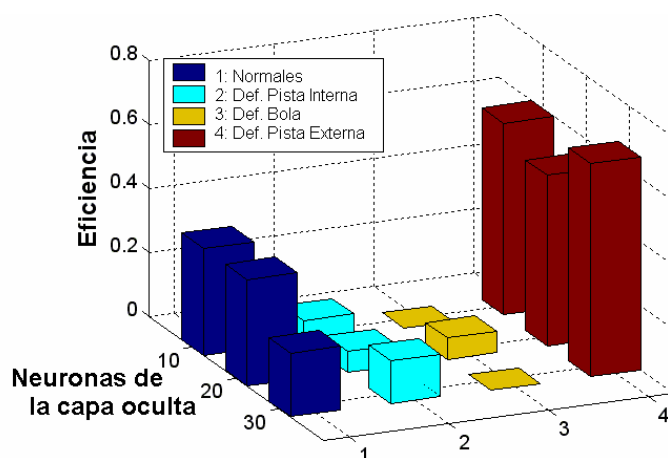


Figura 9.14.- Clasificación de Rodamientos con defecto en pista externa pertenecientes al grupo G1, para una velocidad de giro de 600 RPM.



RPM	Neuronas en capa Oculta	Normal	Defecto en Pista interna	Defecto en Bola	Defecto en Pista externa	Eficiencia de la red
600	10	100	14.28	100	40	63,57
	20	100	25.71	100	77.14	75,71
	30	100	40	100	97.14	84,29
1200	10	100	54.29	68.57	20	60,72
	20	100	68.57	68.57	25.71	65,71
	30	97.14	74.29	80	40	72,86
1800	10	100	88.57	71.43	14.28	68,57
	20	100	74.29	71.43	14.28	65,00
	30	97.14	88.57	85.71	22.86	73,57
Total G2						70 %

Tabla 9.14.- Efectividad en la clasificación de rodamientos del grupo G2 con redes MLP.

En cuanto a los resultados obtenidos para el grupo G2, se observa que algunas de las redes del grupo de datos presentan un ligero sobreaprendizaje para los rodamientos normales, y para velocidades de 1200 y 1800 RPM, aunque vuelven a presentar un comportamiento similar al del grupo G1. También es notorio el aumento de la tasa de éxito para rodamientos con defecto en pista externa a medida que disminuye la velocidad de rotación y aumenta el número de neuronas en la capa oculta de la red. Para esta condición en particular, se alcanzan los mejores índices de éxito a bajas velocidades (600 RPM), como muestra la figura 6.19. El defecto en pista interna logra identificarse mejor a medida que aumenta el número de neuronas en la capa oculta de la red y la velocidad de giro, y por último, el defecto en bola es capaz de identificarse al 100% de efectividad a 600 RPM, mientras que a 1200 RPM y 1800 RPM aumenta su efectividad a medida que aumenta la complejidad de la red. En total, las redes entrenadas con datos del grupo G2, presentan un índice de clasificación (70%) superior a las redes entrenadas con el grupo G1 (64.26%).

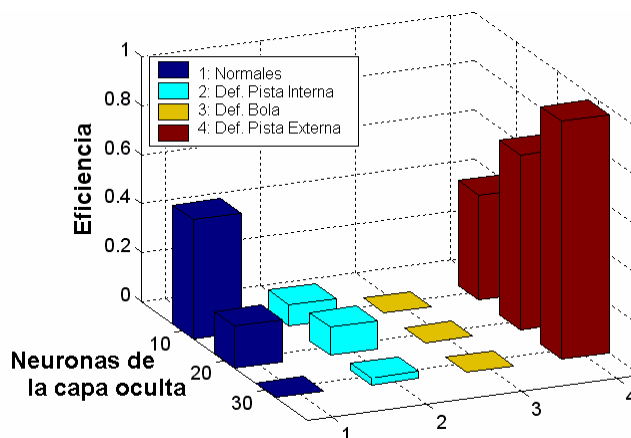


Figura 9.15.- Clasificación de Rodamientos con defecto en Pista externa pertenecientes al grupo G2, para una velocidad de giro de 600 RPM.



RPM	Neuronas en capa Oculta	Normal	Defecto en Pista interna	Defecto en Bola	Defecto en Pista externa	Eficiencia de la red
600	10	100	32.65	100	61.22	73.47
	20	100	42.86	100	83.67	81.63
	30	100	61.22	100	81.63	85.71
1200	10	100	69.39	100	16.33	71.43
	20	100	81.63	100	24.49	76.53
	30	100	85.71	100	40.82	81.63
1800	10	100	71.43	100	0	67.86
	20	100	79.59	100	8.16	71.94
	30	100	89.80	100	18.37	77.04
Total G3						76.36 %

Tabla 9.15.- Efectividad en la clasificación de rodamientos del grupo G3 con redes MLP.

La Tabla 9.15 muestra el mejor índice de clasificación de todos los grupos estudiados (76.36%). Los rodamientos normales y con defecto en bola son identificados con un 100% de éxito a todas las velocidades y a diferentes números de neuronas en su capa oculta. Al igual que en los grupos G1 y G2, la tasa de éxito en los rodamientos con defecto en pista interna aumenta con la velocidad, como muestra la figura 9.16, igualmente que se presenta de manera inversa, para el rodamiento con defecto en pista externa, es decir, la tasa de éxito decrece mientras aumenta la velocidad de rotación.

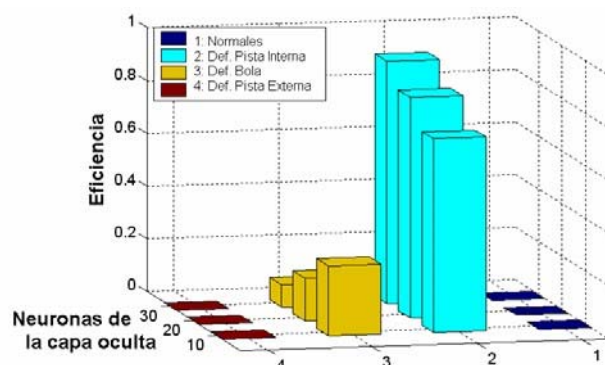
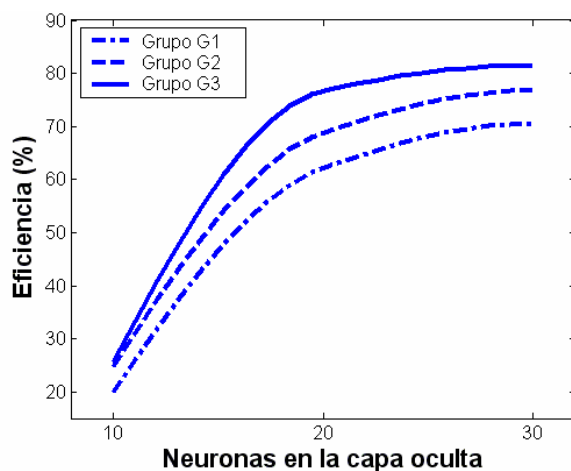


Figura 9.16.- Clasificación de Rodamientos con defecto en Pista interna pertenecientes al Grupo G3, para una velocidad de giro de 1800 RPM.

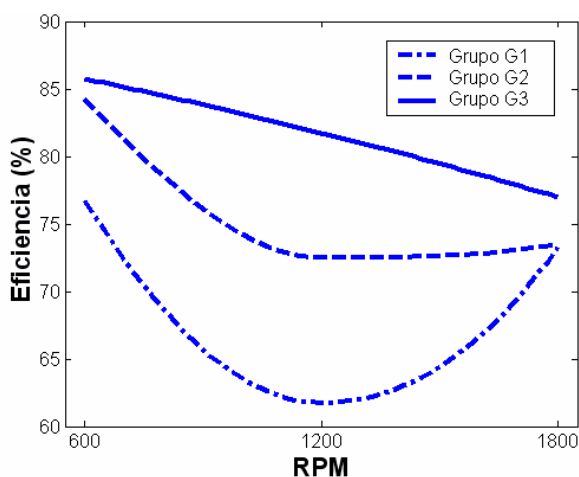
La red más óptima para la metodología planteada, resulta ser aquella que procesa velocidades de rotación de 600 RPM, posee 30 neuronas en su capa oculta, y que maneja mayor cantidad de muestras (Grupo G3), tal red tiene un porcentaje de éxito general de un 85.71%. De manera general, para un aumento del número de patrones de entrenamiento y la complejidad de la red, las redes presentan un mejor funcionamiento.

El comportamiento de las distintas redes MLP, con diferentes grupos de datos y neuronas en su capa oculta, se presenta en la figura, donde se observa un comportamiento creciente para todas las curvas, aunque menos pronunciado de 20 a 30 neuronas, que de 10 a 20 neuronas.



**Figura 9.17.- Evolución general de la eficiencia de redes MLP según el grupo de datos y número de neuronas en la capa oculta utilizados.**

Por lo general, las redes con 30 neuronas en su capa oculta, presentan un comportamiento más eficiente, que aquellas con 20 y 10 neuronas. En la figura se presenta la evolución general de la eficiencia de las redes tipo MLP con 30 neuronas en su capa oculta, para todos los grupos y velocidades estudiadas.



**Figura 9.18.- Evolución general de la eficiencia de redes MLP de 30 neuronas en su capa oculta, con respecto a la velocidad de giro y al grupo de datos utilizado.**

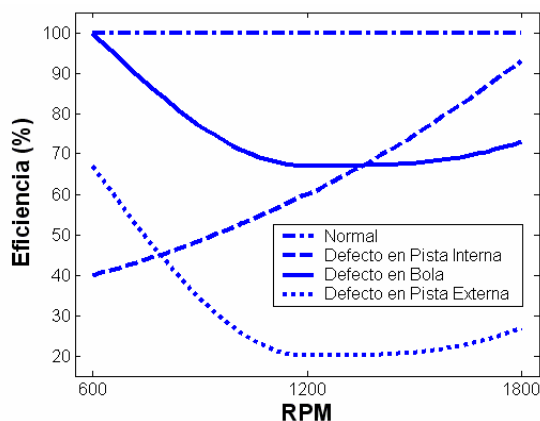
De este modo, es posible observar en la figura que, a una velocidad de 600 RPM las redes presentan un mejor comportamiento. Para los Grupos G1 y G2 la tendencia es que a 1800 RPM se obtiene un mejor índice de clasificación que a 1200 RPM. Por otra parte, la forma decreciente que corresponde al resultado del grupo de datos G3 indica que a medida que aumenta la velocidad, la clasificación se hace más complicada.

En la Tabla se presenta la evolución general de clasificación para las redes con distinto número de neuronas en la capa oculta, y diferente velocidad de rotación.

Grupo	Neuronas en capa Oculta	600 RPM	1200 RPM	1800 RPM
G1	10	68.33	51.67	60
	20	68.33	58.33	60
	30	76.67	61.68	73.33
G2	10	63.57	60.72	68.57
	20	75.71	65.71	65
	30	84.29	72.86	73.57
G3	10	73.47	71.43	67.86
	20	81.63	76.53	71.94
	30	85.71	81.63	77.04

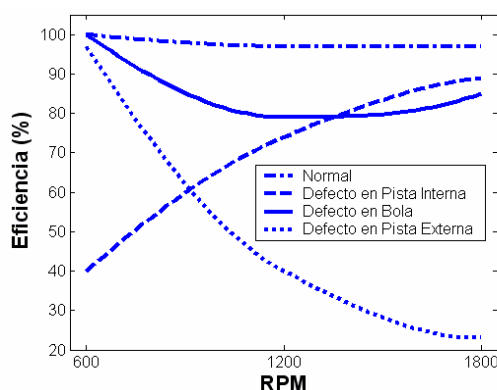
**Tabla 9.16.- Porcentaje de éxito en la clasificación de redes MLP para diferentes grupos de datos y número de neuronas en la capa oculta de ensayos.**

En las siguientes figuras se observa la evolución de la clasificación de las redes MLP de 30 neuronas en su capa oculta, para cada grupo y condición en particular, a las diferentes velocidades de rotación.



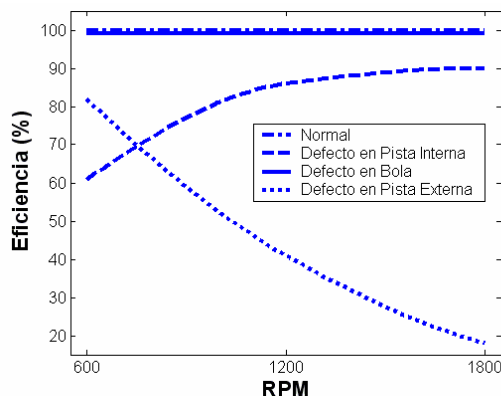
**Figura 9.19.- Evolución de la eficiencia de redes MLP de 30 neuronas en su capa oculta, en la clasificación de cuatro condiciones en rodamientos, con respecto a la velocidad de giro y al grupo de datos G1.**

En este caso, se puede observar que el defecto en bola y en pista externa presentan un descenso brusco de su efectividad, de 600 a 1200 RPM, y que luego experimentan un leve incremento para 1800 RPM. El rodamiento normal presenta un comportamiento perfecto, y el defecto en pista interna es capaz de mejorar desde un 40% de efectividad a 600 RPM, hasta un 93.33% a 1800 RPM. Similares resultados se observan para el grupo de datos G2, que se representan en la figura 9.20.



**Figura 9.20.- Evolución de la eficiencia de redes MLP de 30 neuronas en su capa oculta, en la clasificación de cuatro condiciones en rodamientos, con respecto a la velocidad de giro y al grupo de datos G2.**

En las redes que utilizan el grupo de datos G2 el comportamiento es un poco más efectivo que para las que utilizan el grupo G1. Aunque la condición Normal en el rodamiento se ve afectada en menor medida, el defecto en bola incrementa notablemente su eficiencia a velocidades de giro de 1200 y 1800 RPM. El defecto en pista interna se clasifica con una tasa de éxito similar al grupo G1, y el defecto en pista externa incrementa apreciablemente su eficiencia a 600 y 1200 RPM, aunque a 1800 RPM desciende levemente. Por último, en la figura se presenta un análisis similar para el grupo de datos G3.



**Figura 9.21.- Evolución de la eficiencia de redes MLP de 30 neuronas en su capa oculta, en la clasificación de cuatro condiciones en rodamientos, con respecto a la velocidad de giro y al grupo de datos G3.**

En la figura se observa que el defecto en bola y la condición de rodamiento Normal, coinciden a todas las velocidades, con una tasa de clasificación de 100 %. El defecto en pista interna muestra una mejoría con respecto al grupo G2, y el defecto en pista externa sigue la tendencia mostrada en los grupos G1 y G2, que consiste en lograr altos índices de clasificación a bajas revoluciones y disminuir su efectividad a medida que aumentan las revoluciones.

### **Conclusiones a los resultados de aplicación de redes MLP**

Desde el punto de vista de cada defecto en particular, es claramente notorio que un rodamiento en condiciones normales puede detectarse independientemente de la velocidad de adquisición de la medida, del tamaño de la muestra y la complejidad de la red neuronal.

Sin embargo, un rodamiento con defecto en su pista externa puede detectarse a baja velocidad y con una red neuronal compleja (30 neuronas).

Con respecto a los rodamientos con defectos en su pista interna, está claro que se clasifican mejor a altas revoluciones (1800 RPM) en cualquiera de los grupos estudiados, y mejora su efectividad con el aumento de la complejidad de la red.

Por otra parte, los rodamientos con defecto en su elemento rodante, pueden clasificarse en general de manera correcta a bajas revoluciones, y a altas revoluciones con una gran cantidad de información (Grupo G3).

### **3.3.2. REDES DE BASE RADIAL (RBF)**

Su utilización ofrece algunas ventajas con respecto a las redes MLP, como la rapidez del entrenamiento y que permite una fácil optimización debido a que posee menos parámetros de diseño: neuronas en la capa oculta, y la función de activación. Las redes RBF definen una relación no lineal entre las variables de entrada y las variables de salida de la red, propagando hacia la salida toda la información recibida en la entrada, siendo su arquitectura muy similar a la de las redes MLP.

Al igual que las redes MLP, las redes tipo RBF están programadas con la Toolbox de redes neuronales de MatLab®.

El diseño de redes RBF es mucho más sencillo que el de redes MLP. Fundamentalmente, la arquitectura de red y su aprendizaje determinan el comportamiento de la misma.

### **Diseño de la arquitectura de red**

Comprende las partes fundamentales de la red, entre ellas, la función de activación y el número de neuronas de cada una de las capas.

La selección de la función de activación en redes RBF está limitada a curvas con forma de campana o similares, siendo la más utilizada la función gaussiana.

Con respecto al número de neuronas en la capa oculta, se utilizan 10 números diferentes de neuronas en la capa oculta para cada red (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100), con el fin de optimizar el proceso de clasificación.

### Aprendizaje de la red

<b>Condición 1 (N):</b>	[0 0 0 1]	Rodamiento normal
<b>Condición 2 (I):</b>	[0 0 1 0]	Rodamiento con defecto en pista interna
<b>Condición 3 (B):</b>	[0 1 0 0]	Rodamiento con defecto en bola
<b>Condición 4 (E):</b>	[1 0 0 0]	Rodamiento con defecto en pista externa

Tabla 9.17.- Valores numéricos de la salida objetivo o salida esperada de ensayos.

Parámetros	Selección	
<i>Normalización de los valores de entrada</i>	En el rango [0; 1]	
<i>Distribución de las entradas de la red</i>	Entrenamiento	75 %
	Prueba	25%
<i>Tipo de aprendizaje</i>	Supervisado	
<i>Valores de la salida esperada</i>	Ver Tabla 5.10	
<i>Anchura de la base radial</i>	Ver Ecuaciones (5.50) y (5.51)	
<i>Criterios de Parada</i>	MSE límite	10%
	Máximo número de Neuronas en capa oculta	[10, 20.,100]

Tabla 9.18.- Parámetros de diseño del entrenamiento de la red RBF.

Con los parámetros de diseño mencionados, se cuenta con una red neuronal para cada grupo de datos estudiado (Grupos 1, 2 y 3), con diez cantidades distintas de neuronas de la capa oculta (10, 20,...,100), y para cada una de las velocidades de rotación estudiadas (600, 1200 y 1800 RPM). En total, se han diseñado 90 redes RBF.

Los resultados que se arrojan son los siguientes:



GRUPO 1-600 RPM												
Neuronas en la Capa Oculta			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Entrenamiento	<i>d</i> óptimo		0.32	0.47	0.43	0.45	0.39	0.39	0.41	0.41	0.41	0.4
	% Eficiencia	N	97.33	97.78	97.78	97.78	96.89	97.78	96.89	97.33	98.67	98.67
		I	6.67	27.55	32	38.22	39.55	43.11	48.44	50.22	52	50.22
		B	96.89	87.11	88.44	88.44	89.78	90.67	89.78	92	92	93.33
		E	50.67	57.78	68.44	67.11	72.89	72.44	72.89	73.33	74.22	77.33
		T	62.89	67.55	71.67	72.89	74.78	76	77	78.22	79.22	79.89
Prueba	<i>d</i> óptimo		0.35	0.37	0.37	0.36	0.33	0.34	0.34	0.33	0.34	0.34
	% Eficiencia	N	97.33	97.33	98.67	96	97.33	96	96	97.33	96	96
		I	6.67	13.33	20	21.33	17.33	16	17.33	17.33	21.33	24
		B	97.33	93.33	92	92	94.67	94.67	94.67	94.6	94.66	94.66
		E	50.67	61.33	60	64	61.33	64	66.67	61.33	65.33	66.67
		T	63	66.33	67.67	68.33	67.67	67.67	68.67	67.67	69.33	70.33
GRUPO 1-1200 RPM												
Neuronas en la Capa Oculta			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Entrenamiento	<i>d</i> óptimo		0.32	0.27	0.31	0.37	0.37	0.37	0.58	0.51	0.51	0.48
	% Eficiencia	N	84.89	81.78	88	85.77	86.67	88.44	91.55	89.78	89.78	88.89
		I	93.33	96.89	92.89	88	88	89.33	79.55	80	80.44	82.22
		B	7.55	7.55	12	30.67	32	33.56	61.77	55.55	56.89	59.11
		E	53.78	68.44	72	68.89	72	72	56.44	66.22	68.44	69.33
		T	59.89	63.67	66.22	68.33	69.67	71.33	72.33	72.88	73.89	74.89
Prueba	<i>d</i> óptimo		0.31	0.36	0.29	0.32	0.3	0.29	0.37	0.3	0.31	0.3
	% Eficiencia	N	76	78.67	78.67	77.33	74.67	74.67	80	78.67	74.66	78.66
		I	97.33	88	97.33	90.67	90.67	92	85.33	92	92	90.66
		B	9.33	13.33	4	14.66	17.33	12	24	9.33	14.66	12
		E	50.67	61.33	64	69.33	64	68	64	65.33	68	68
		T	58.33	60.33	61	63	61.67	61.67	63.33	61.33	62.33	62.33
GRUPO 1-1800 RPM												
Neuronas en la Capa Oculta			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Entrenamiento	<i>d</i> óptimo		0.78	0.73	0.67	0.67	0.67	0.72	0.6	0.83	0.57	0.99
	% Eficiencia	N	91.55	88.89	85.78	84.89	80.89	86.22	80.44	85.78	79.55	83.55
		I	68.89	71.11	78.22	76	78.67	80	80.89	84.44	86.22	85.33
		B	52	52.89	58.67	64	69.78	70.67	71.11	79.56	68.89	83.55
		E	22.67	36.89	37.78	39.11	45.78	45.78	52.44	43.55	60.44	47.11
		T	58.78	62.44	65.11	66	68.78	70.67	71.22	73.33	73.78	74.89
Prueba	<i>d</i> óptimo		0.48	0.57	0.58	0.55	0.58	0.4	0.43	0.47	0.74	0.64
	% Eficiencia	N	86.67	88	80	81.33	80	74.67	73.33	80	81.33	80
		I	73.33	76	70.67	73.33	49.33	74.67	72	68	64	61.33
		B	38.67	48	48	41.33	61.33	42.67	50.67	42.67	56	53.33
		E	32	22.67	37.33	36	41.33	50.67	48	48	34.66	45.33
		T	57.67	58.67	59	58	58	60.67	61	59.67	59	60

Tabla 9.19.- Resultados para redes RBF del grupo G1 con anchura óptima.

La complejidad de la red neuronal está dada por el número de neuronas en su capa oculta, y afecta enormemente al comportamiento de la red. La red más eficiente alcanza una tasa de 70.33%, con 100 neuronas en su capa oculta y una anchura de 0.34.

El valor de anchura óptima se consigue al variar el valor de *d* para cada una de las redes empleadas. Tras conseguir el valor óptimo, las redes se emplean para una clasificación posterior, que se detalla en el apartado siguiente.

Las redes que han presentado mejor comportamiento para cada grupo y velocidad de estudio, se muestran en la Tabla. Cabe destacar que a velocidades más bajas, es mejor la tasa de clasificación, tal como se determinó con redes MLP.



Red	Número de neuronas en la capa oculta	$d_{\text{óptimo}}$	Eficiencia General (%)
RBFG1-600	100	0.34	70.33
RBFG1-1200	70	0.37	63.33
RBFG1-1800	70	0.43	61
RBFG2-600	90	0.27	70.71
RBFG2-1200	80	0.3	64.28
RBFG2-1800	30	0.44	59.28
RBFG3-600	40	0.3	70.91
RBFG3-1200	80, 90, 100	0.33, 0.28	63.57
RBFG3-1800	100	0.31	58.06

Tabla 9.20.- Redes RBF óptimas para diferentes grupos de datos y velocidades.

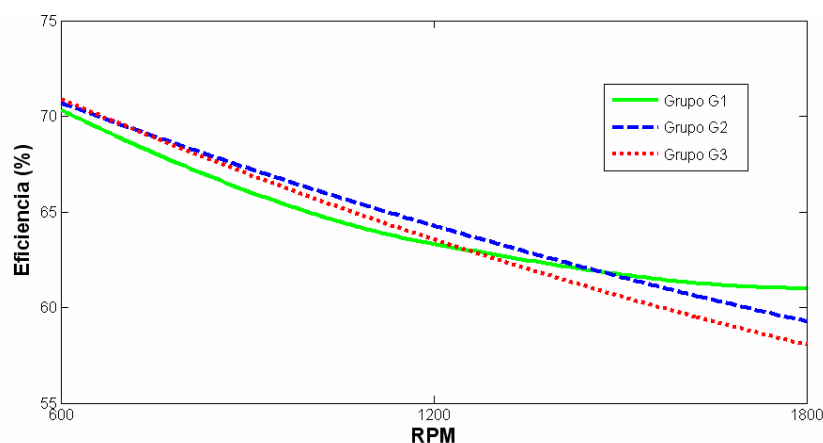


Figura 9.22.- Evolución de la eficiencia de la red según el grupo de datos y la velocidad.

En la figura se ilustra un ejemplo de la evolución del entrenamiento en las distintas clases de condiciones, que corresponde a la red RBFG3-600 con 30 neuronas en su capa oculta.

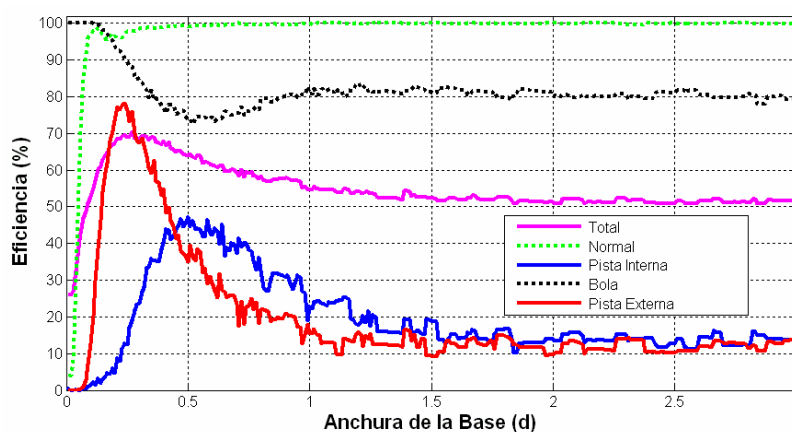


Figura 9.23.- Evolución del entrenamiento a nivel individual de la red RBFG3-600 con 30 neuronas en su capa oculta, según el ancho de su base radial.



Como se ilustra en la figura, las cuatro clases que entrenan la red presentan un comportamiento diferenciado a distinta anchura de base radial:

- Los rodamientos normales logran entrenarse con facilidad a una anchura mayor de 0.15, obteniendo un porcentaje de eficiencia mayor de 90% pasada una anchura de 0.1.
- El rodamiento con defecto en bola presenta un comportamiento perfecto a anchuras menores de 0.1, estabilizando su comportamiento para las demás anchuras en torno a un 80%.
- El rodamiento con defecto en su pista interna obtiene su mejor rendimiento (47%) a una anchura de base de 0.5, obteniendo cifras bastante bajas a demás anchuras.
- Finalmente, el rodamiento con defecto en su pista externa alcanza su mejor índice de eficiencia (80%) a una anchura de base de 0.25.

Estas cuatro condiciones anteriores, determinan que la eficiencia general sea máxima a una anchura de base de 0.28, con una tasa general de un 70 %.

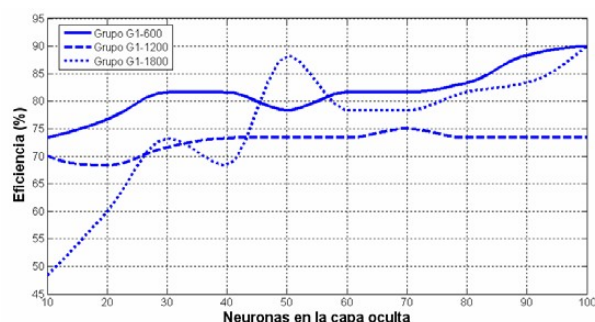
### **RESULTADOS RBF**

En las siguientes Tablas se presentan los resultados de la clasificación de la condición de rodamientos de bola con la utilización de redes RBF, y con los distintos parámetros estudiados. Los resultados están clasificados por tipo de defecto, velocidad de giro (RPM), y neuronas en la capa oculta.

GRUPO G1-600 RPM												
Neuronas en la Capa Oculata			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
d óptimo			0.35	0.37	0.37	0.36	0.33	0.34	0.34	0.33	0.34	0.34
% Eficiencia	N	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	I	0	6.67	26.67	26.67	13.33	26.67	26.67	33.33	53.33	60	
	B	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
	E	93.33	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
	T	73.33	76.67	81.67	81.67	78.33	81.67	81.67	83.33	88.33	90.00	81.67
GRUPO G1-1200 RPM												
Neuronas en la Capa Oculata			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
d óptimo			0.31	0.36	0.29	0.32	0.3	0.29	0.37	0.3	0.31	0.3
% Eficiencia	N	100	93.33	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	I	93.33	93.33	93.33	93.33	93.33	93.33	93.33	93.33	93.33	93.33	93.33
	B	0	0	0	0	0	0	6.67	0	0	0	
	E	86.67	86.67	93.33	100	100	100	100	100	100	100	
	T	70.00	68.33	71.67	73.33	73.33	73.33	75.00	73.33	73.33	73.33	72.5
GRUPO G1-1800 RPM												
Neuronas en la Capa Oculata			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
d óptimo			0.48	0.57	0.58	0.55	0.58	0.4	0.43	0.47	0.74	0.64
% Eficiencia	N	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	I	93.33	93.33	93.33	93.33	93.33	93.33	93.33	93.33	93.33	93.33	93.33
	B	0	46.67	53.33	46.67	93.33	33.33	40	53.33	100	93.33	
	E	0	0	46.67	33.33	66.66	86.67	80	80	40	73.33	
	T	48.33	60.00	73.33	68.33	88.33	78.33	78.33	81.67	83.33	90.00	75

**Tabla 9.21.- Efectividad en la clasificación de rodamientos del Grupo G1 con redes RBF.**

Los resultados relativos al grupo G1 presentan un mejor índice de clasificación a bajas velocidades de rotación. A 600 RPM alcanzan una tasa promedio de 81.67 %, para 1200 RPM corresponde una tasa promedio de clasificación de 72.5 %, y para 1800 RPM, logran un índice de clasificación promedio de 75 %. La red que presenta un mejor comportamiento es la red RBFG1-600, con 100 neuronas en su capa oculta, que logra un 90 % de índice de eficiencia. La variación de la eficiencia absoluta de clasificación según el número de neuronas para el grupo G1, se presenta en la figura.



**Figura 9.24.- Eficiencia absoluta de clasificación para redes RBF<sub>G1</sub> a distintas velocidades de giro, según el número de neuronas en su capa oculta.**

GRUPO G2-600 RPM											
Neuronas en la Capa Oculta		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
d óptimo		0.32	0.32	0.32	0.31	0.31	0.28	0.31	0.28	0.25	0.28
% Eficiencia	N	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	I	0	0	2.86	0	2.86	11.43	0	14.29	20	8.57
	B	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	E	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	T	75.00	75.00	75.72	75.00	75.72	77.86	75.00	78.57	80.00	77.14
GRUPO G2-1200 RPM											
Neuronas en la Capa Oculta		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
d óptimo		0.32	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.37	0.3	0.27	0.27
% Eficiencia	N	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	I	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	B	0	0	0	0	0	0	11.43	0	0	0
	E	60	94.29	94.29	94.29	94.29	94.29	97.14	100	100	100
	T	65.00	73.57	73.57	73.57	73.57	73.57	77.14	75.00	75.00	75.00
GRUPO G2-1800 RPM											
Neuronas en la Capa Oculta		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
d óptimo		0.5	0.39	0.44	0.55	0.51	0.57	0.67	0.67	0.53	0.53
% Eficiencia	N	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	I	100	100	100	100	100	97.14	100	100	100	100
	B	11.43	5.71	25.71	65.71	62.86	74.29	91.43	94.29	80	88.57
	E	2.86	51.43	20	34.29	34.29	25.71	14.29	14.29	31.43	40
	T	53.57	64.29	61.43	75.00	74.29	74.29	76.43	77.15	77.86	82.14

Tabla 9.22.- Efectividad en la clasificación de rodamientos del Grupo G2 con redes RBF.

Los resultados relativos al grupo G2 también presentan un mejor índice de clasificación a bajas velocidades de rotación. A 600 RPM alcanzan una tasa promedio de 76.5 %, para 1200 RPM corresponde una tasa de 73.5 %, y para 1800 RPM, un 71.64 %. La red que presenta un mejor comportamiento es la red RBFG2-1800, con 100 neuronas en su capa oculta, que logra un 82.14 % de eficiencia. La variación de la eficiencia absoluta de clasificación según el número de neuronas para el grupo G2, se presenta en la figura.

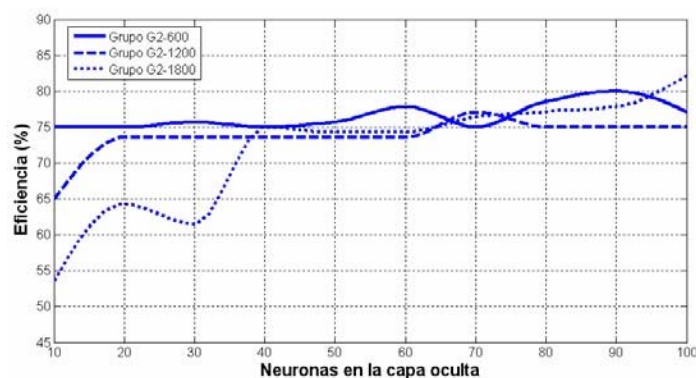


Figura 9.25.- Eficiencia absoluta de clasificación para redes RBFG2 a distintas velocidades de giro, según el número de neuronas en su capa oculta.



GRUPO G3-600 RPM											
Neuronas en la Capa Oculta		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
d óptimo		0.27	0.23	0.3	0.3	0.22	0.26	0.22	0.22	0.26	0.28
% Eficiencia	N	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	I	0	0	10.20	14.29	0	8.16	4.08	8.16	16.33	36.73
	B	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	E	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	T	75.00	75.00	77.55	78.57	75.00	77.04	76.02	77.04	79.08	84.18
GRUPO G3-1200 RPM											
Neuronas en la Capa Oculta		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
d óptimo		0.35	0.38	0.35	0.32	0.34	0.25	0.25	0.33	0.33	0.28
% Eficiencia	N	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	I	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	B	0	0	0	2.04	4.08	0	0	2.04	4.08	2.04
	E	22.45	61.22	85.71	97.96	95.92	100	100	97.96	97.96	100
	T	55.61	65.31	71.43	75.00	75.00	75.00	75.00	75.00	75.51	75.51
GRUPO G3-1800 RPM											
Neuronas en la Capa Oculta		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
d óptimo		0.31	0.27	0.42	0.38	0.37	0.44	0.31	0.29	0.31	0.31
% Eficiencia	N	100	95.92	100	100	100	100	97.96	97.96	95.92	97.96
	I	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	B	0	0	26.53	11.32	22.45	51.02	4.08	4.08	10.20	10.20
	E	42.86	87.76	30.61	48.98	36.73	36.73	79.59	81.63	87.76	89.80
	T	60.72	70.92	64.29	65.08	64.80	71.94	70.41	70.92	73.47	74.49

Tabla 9.23.- Efectividad en la clasificación de rodamientos del Grupo G3 con redes RBF.

En el grupo G3 también se refleja un mejor índice de clasificación a bajas velocidades de rotación. A 600 RPM alcanzan una tasa promedio de 77.45 %, para 1200 RPM corresponde una tasa de 71.84 %, y para 1800 RPM, logran un índice de clasificación promedio de 68.70 %. La red que presenta un mejor comportamiento es la red RBFG3-600, con 100 neuronas en su capa oculta, que logra un 84.18% de eficiencia. La variación de la eficiencia absoluta de clasificación según el número de neuronas para el grupo G3, se presenta en la figura.

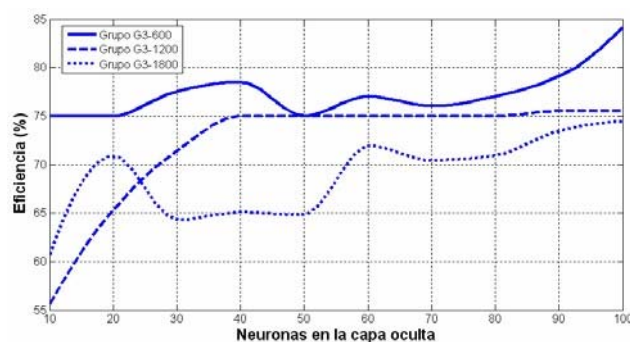


Figura 9.26.- Eficiencia absoluta de clasificación para redes RBFG3 a distintas velocidades de giro, según el número de neuronas en su capa oculta.

### **Conclusiones a los resultados de aplicación de redes RBF**

Desde el punto de vista de cada defecto en particular, se observa claramente que, un rodamiento en condiciones normales puede detectarse independientemente de la velocidad de adquisición de la medida, del tamaño de la muestra, y la complejidad de la red neuronal, con algunas desviaciones a 1800 RPM. Sin embargo, un rodamiento con defecto en su pista externa puede detectarse a baja velocidad y con mejor precisión si la red neuronal es más compleja.

Con respecto a los rodamientos con defectos en su pista interna, está claro que se clasifican mejor a altas revoluciones (1200 y 1800 RPM), en cualquiera de los grupos estudiados, y a mejora su efectividad con el aumento de la complejidad de la red. Por otra parte, los rodamientos con defecto en su elemento rodante, pueden clasificarse de manera correcta a bajas revoluciones en general, tal como sucede con las redes MLP.

#### **3.3.3. PNN (redes neuronales probabilísticas)**

Al igual que las redes RBF, la capa oculta de una red PNN, selecciona los centroides más cercano al patrón de entrada, según el número de neuronas ocultas, mientras que la capa de salida o capa “competitiva” realiza una sumatoria de todas las contribuciones de la capa anterior, produciendo un vector de probabilidades para cada clase. De esta forma, una función de activación competitiva evalúa dicha sumatoria, generando un valor de 1 para la neurona de salida con mayor valor de probabilidad y 0 para todas las demás. Comúnmente se dice que esta neurona se activa y las demás no lo hacen.

#### **Diseño de la arquitectura de red**

Comprende las partes fundamentales de la red, entre ellas la función de activación y el número de neuronas de cada una de las capas.

La función de activación utilizada es la función de base radial o función gaussiana, utilizada en el diseño de redes RBF. El número de neuronas en la capa de entrada y salida permanece igual.

Al igual que las redes MLP y RBF, el número de neuronas de la capa de entrada de la red, se compone de la longitud de los vectores de entrada (18), mientras que el número de

neuronas en la capa de salida, se compone de las condiciones totales a diagnosticar, o clasificaciones posibles (4).

El número de neuronas en la capa oculta de una red PNN, viene dado por la cantidad de datos de entrada, o pares ordenados existentes (Patrón-Objetivo). En ese sentido, para el grupo de datos G1, se tienen 1200 neuronas, para el grupo G2, se tienen 2800, y para el grupo G3, se tienen 3920. El gran número de neuronas en la capa oculta de las redes PNN es uno de los mayores inconvenientes en su aplicación.

### Aprendizaje de la red

El aprendizaje de la red es de tipo supervisado, y los subgrupos de entrenamiento y prueba están dispuestos de la misma manera que con las redes MLP y RBF, es decir, un 75% de los datos compone el subconjunto de entrenamiento, y el 25% restante constituye el subconjunto de datos de prueba.

La red se ha programado en MatLab®, con los datos de entrada presentados para entrenar las redes MLP y RBF, normalizados entre un rango de [0, 1], y con la salida esperada (S) que indica la Tabla.

Parámetros	Selección	
<i>Normalización de los valores de entrada</i>	En el rango [0; 1]	
<i>Distribución de las entradas de la red</i>	Entrenamiento	75 %
	Prueba	25%
<i>Tipo de aprendizaje</i>	Supervisado	
<i>Valores de la salida esperada</i>	Ver Tabla 5.10	
<i>Anchura de la base radial</i>	Ver Ecuaciones (5.52) y (5.53)	

Tabla 9.24.- Parámetros de diseño del entrenamiento de la red PNN.

En resumen, se cuenta con una red neuronal para cada grupo de datos estudiado (grupos G1, G2 y G3), con tres distintas cantidades de neuronas de la capa oculta (1200, 2800 y 3920), y para cada una de las velocidades de rotación estudiadas (600, 1200 y 1800 RPM). En total, se han diseñado 9 redes PNN.





°GRUPO G1-600 RPM				°GRUPO G1-1200 RPM				°GRUPO G1-1800 RPM			
Entrenamiento	$d$ óptimo		0.01	$d$ óptimo		0.01	$d$ óptimo		0.01	$d$ óptimo	
	% Eficiencia	N	100	% Eficiencia	N	100	% Eficiencia	N	100	% Eficiencia	N
		I	100		I	100		I	100		I
		B	100		B	100		B	100		B
		E	100		E	100		E	100		E
		T	100		T	100		T	100		T
Prueba	$d$ óptimo		0.06	$d$ óptimo		0.06	$d$ óptimo		0.08	$d$ óptimo	
	% Eficiencia	N	100	% Eficiencia	N	86.67	% Eficiencia	N	76	% Eficiencia	N
		I	53.33		I	64		I	51.2		I
		B	49.07		B	57.6		B	57.6		B
		E	57.6		E	51.2		E	49.07		E
		T	65		T	64.87		T	58.47		T

Tabla 9.25.- Resultados de Entrenamiento y Prueba de las redes PNN del grupo G1.

Como se observa en la Tabla, el entrenamiento de la red tiene una eficiencia de 100%, básicamente debido a la gran cantidad de neuronas en su capa oculta. Por otra parte, el subconjunto de prueba presenta mejor rendimiento a bajas velocidades de rotación, tal como ha sucedido con las redes MLP y RBF.

Para el grupo de datos G2, el resultado previo de entrenar y probar las redes PNN, para todas las velocidades de giro estudiadas, se muestra en la Tabla.

°GRUPO G2-600 RPM				°GRUPO G2-1200 RPM				°GRUPO G2-1800 RPM			
Entrenamiento	$d$ óptimo		0.01	$d$ óptimo		0.01	$d$ óptimo		0.01	$d$ óptimo	
	% Eficiencia	N	100	% Eficiencia	N	100	% Eficiencia	N	100	% Eficiencia	N
		I	100		I	100		I	100		I
		B	100		B	100		B	100		B
		E	100		E	100		E	100		E
		T	100		T	100		T	100		T
Prueba	$d$ óptimo		0.03	$d$ óptimo		0.08	$d$ óptimo		0.07	$d$ óptimo	
	% Eficiencia	N	99.43	% Eficiencia	N	88	% Eficiencia	N	78.86	% Eficiencia	N
		I	54.86		I	54.86		I	64.91		I
		B	56.69		B	68.57		B	58.51		B
		E	71.31		E	56.69		E	61.26		E
		T	70.57		T	67.03		T	65.89		T

Tabla 9.26.- Resultados de Entrenamiento y Prueba de las redes PNN del grupo G2.

Para el grupo de datos G3, el resultado previo de entrenar y probar las redes PNN, para todas las velocidades de giro estudiadas, se muestra en la Tabla.

°GRUPO G3-600 RPM				°GRUPO G3-1200 RPM				°GRUPO G3-1800 RPM			
Entrenamiento	$d$ óptimo		0.01	$d$ óptimo		0.01	$d$ óptimo		0.01		
	% Eficiencia	N	100	% Eficiencia	N	100	% Eficiencia	N	100		
		I	100		I <td>100</td> <th>I<td>100</td></th>	100		I <td>100</td>	100		
		B	100		B <td>100</td> <th>B<td>100</td></th>	100		B <td>100</td>	100		
		E	100		E <td>100</td> <th>E<td>100</td></th>	100		E <td>100</td>	100		
		T	100		T <td>100</td> <th>T<td>100</td></th>	100		T <td>100</td>	100		
Prueba	$d$ óptimo		0.01	$d$ óptimo		0.04	$d$ óptimo		0.07		
	% Eficiencia	N	98.37	% Eficiencia	N	91.43	% Eficiencia	N	81.63		
		I	62.04		I <td>62.69</td> <th>I<td>65.31</td></th>	62.69		I <td>65.31</td>	65.31		
		B	60.08		B <td>60.73</td> <th>B<td>55.51</td></th>	60.73		B <td>55.51</td>	55.51		
		E	71.18		E <td>54.86</td> <th>E<td>42.45</td></th>	54.86		E <td>42.45</td>	42.45		
		T	72.92		T <td>67.43</td> <th>T<td>61.22</td></th>	67.43		T <td>61.22</td>	61.22		

Tabla 9.27.- Resultados de Entrenamiento y Prueba de las redes PNN del grupo G3.

El entrenamiento del grupo de datos G3 indica que los resultados observados en el entrenamiento de los grupos G1 y G2 no son una casualidad, y que el entrenamiento se hace más exacto mientras menor valor tiene el ancho de la base radial. Adicionalmente, con un ancho de base radial de 0.01 se obtiene el mejor resultado para el subconjunto de datos de prueba, alcanzando un 72.92%.

Las redes PNN que han presentado mejor comportamiento para cada grupo y velocidad de estudio, se muestran en la Tabla 9.28. Cabe destacar que a velocidades más bajas, es mucho mejor la tasa de clasificación, tal como se determinó con redes MLP y RBF.

Red	Número de neuronas en la capa oculta	$d_{\text{óptimo}}$	Eficiencia General (%)
PNNG1-600	1200	0.06	65
PNNG1-1200	1200	0.06	64.87
PNNG1-1800	1200	0.08	58.47
PNNG2-600	2800	0.03	70.57
PNNG2-1200	2800	0.08	67.03
PNNG2-1800	2800	0.07	65.89
PNNG3-600	3920	0.01	72.92
PNNG3-1200	3920	0.04	67.43
PNNG3-1800	3920	0.07	61.22

Tabla 9.28.- Redes PNN óptimas para diferentes grupos de datos y velocidades.

### Resultados Red Neuronal Probabilística (PNN)

Siguiendo la metodología utilizada para las redes MLP y RBF, los resultados absolutos para el grupo de datos G1, G2 y G3 son los siguientes:

GRUPO G1		600 RPM	1200 RPM	1800 RPM
Neuronas en la capa oculta		1200	1200	1200
$d_{\text{optimo}}$		0.06	0.06	0.08
% Eficiencia	N	100	93.33	93.33
	I	73.33	80	66.67
	B	80	80	66.67
	E	80	73.33	66.67
	T	83.33	77.77	73.33

Tabla 9.29.- Efectividad en la clasificación de rodamientos del grupo G1 con redes PNN.

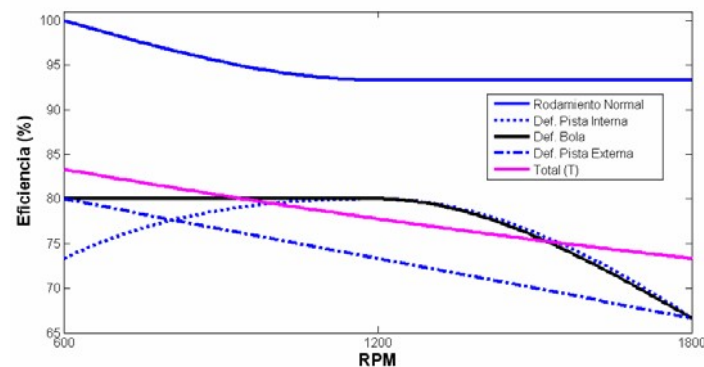
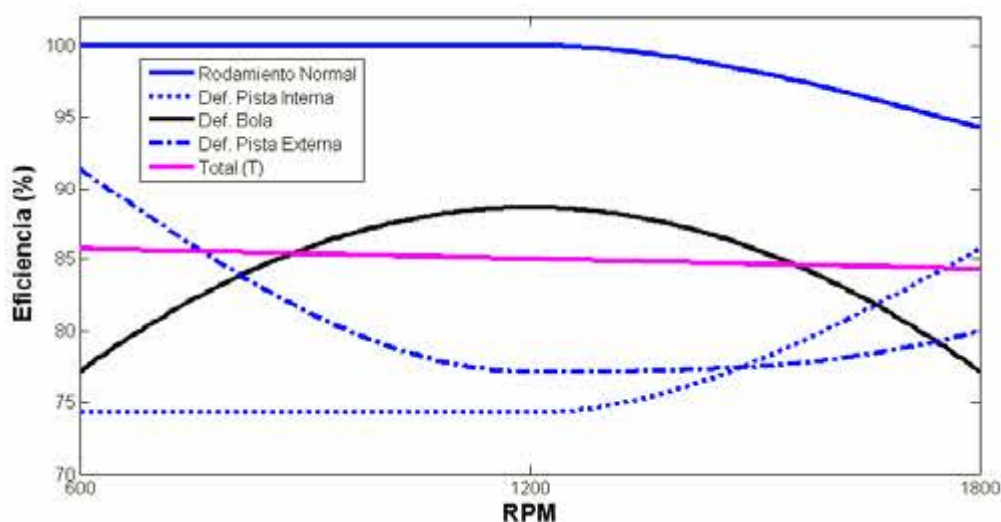


Figura 9.27.- Eficiencia de la clasificación de cuatro condiciones en rodamientos para redes PNN G1 a distintas RPM.

La figura ilustra el descenso de la tasa de clasificación a medida que aumenta la velocidad de giro del rodamiento, y que la condición de Rodamiento Normal (N), es la única que logra estabilizarse a velocidades de giro de 1200 y 1800 RPM.

GRUPO G2		600 RPM	1200 RPM	1800 RPM
Neuronas en la capa oculta		2800	2800	2800
$d_{\text{optimo}}$		0.03	0.08	0.07
% Eficiencia	N	100	100	94.29
	I	74.28	74.28	85.71
	B	77.14	88.57	77.14
	E	91.42	77.14	80.00
	T	85.71	85.00	84.29

Tabla 9.30.- Efectividad en la clasificación de rodamientos del grupo G2 con redes PNN.



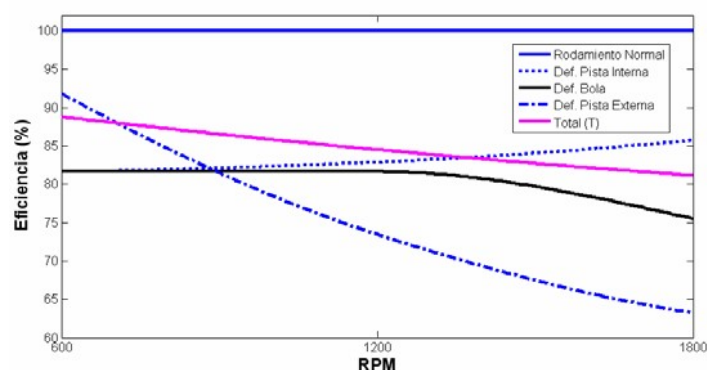
**Figura 9.28.- Eficiencia de la clasificación de cuatro condiciones en rodamientos para redes PNN2 a distintas RPM.**

En la figura es posible observar que la evolución de la eficiencia total en este caso, resulta casi lineal, y que las condiciones de Defecto en Bola y Rodamiento Normal tienden a decrecer, mientras que la condición Defecto en Pistas Interna ve aumentada su tasa de clasificación a altas revoluciones. La Tabla muestra la efectividad en la clasificación de diferentes condiciones en rodamientos de bola, según la velocidad de giro, utilizando redes PNN y el grupo de datos G3.

GRUPO G3		600 RPM	1200 RPM	1800 RPM
Neuronas en la capa		3920	3920	3920
$d_{\text{óptimo}}$		0.01	0.04	0.07
% Eficiencia	N	100	100	100
	I	81.63	82.85	85.71
	B	81.63	81.63	75.51
	E	91.84	73.47	63.26
	T	88.78	84.49	81.12

**Tabla 9.31.- Efectividad en la clasificación de rodamientos del grupo G3 con redes PNN.**

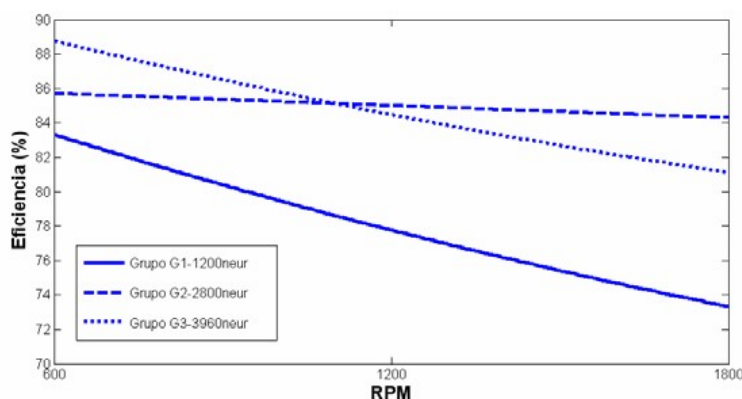
La figura 9.29 muestra la evolución de la clasificación individual (N, I, B, E) y general (T) de la red PNN correspondiente al grupo de datos G3, para diferentes velocidades de giro.



**Figura 9.29.- Eficiencia de la clasificación de cuatro condiciones en rodamientos para redes PNNG3 a distintas RPM.**

En la figura se observa que la curva que representa la evolución de la clasificación total decrece mientras aumenta la velocidad de rotación, igual que para los grupos G1 y G2. Es notable mencionar que la condición Rodamiento Normal es clasificada al 100% de eficiencia, y que las condiciones Defecto en Bola y Defecto en Pista Externa, decrecen a altas revoluciones. Finalmente, la condición Defecto en Pista Interna tiende a incrementar su tasa de éxito mientras aumenta la velocidad de giro.

Finalmente, la figura representa el comportamiento absoluto de las redes PNN estudiadas a diferentes velocidades de rotación, según el grupo de datos.



**Figura 9.30.- Evolución de la eficiencia de clasificación de redes PNN para grupos de datos G1, G2 y G3 a diferentes velocidades de giro.**

La figura demuestra que la tendencia de clasificación de una red PNN presenta un comportamiento cercano al lineal, tomando en cuenta la naturaleza de los datos estudiados. En general, a bajas revoluciones el proceso de clasificación resulta más eficiente, y a mayor cantidad de datos, la red presenta un mejor comportamiento, a excepción de los grupos G2 y G3 a una velocidad de giro de 1800 RPM.

## Conclusión PNN

Los resultados mostrados por las redes PNN presentan un comportamiento más regular que las redes MLP y RBF. Desde el punto de vista de cada defecto en particular, se observa que los rodamientos en condiciones normales poseen índices de clasificación muy altos, que se incrementan con grupos de datos más numerosos. Por otra parte, un rodamiento con defecto en su pista interna puede detectarse aceptablemente de manera constante sobre un índice de clasificación de 66.67%, hasta alcanzar un máximo de 85.71% a 1800 RPM para el grupo de datos G3.

Con respecto a los rodamientos con defectos en su pista externa, logran clasificarse mucho mejor a bajas revoluciones (600 RPM), independientemente del grupo de datos. Por otra parte, los rodamientos con defecto en su elemento rodante, presentan un comportamiento ligeramente superior a bajas revoluciones.

### 3.3.4. SISTEMA HÍBRIDO

Consisten en la combinación de métodos de clasificación para alcanzar mayores tasas de éxito. Se emplean para aunar las capacidades de trabajo de las tres redes neuronales propuestas, MLP, RBF y PNN.

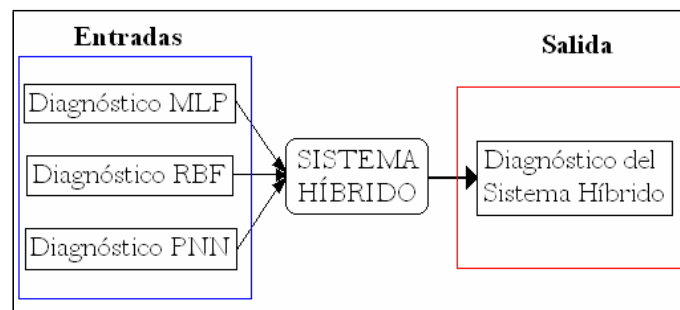


Figura 9.31.- Diagrama de operación del Sistema Híbrido propuesto.

La ecuación propuesta es la siguiente:

$$Fd_i = \frac{Diag_i(MLP) + Diag_i(RBF) + Diag_i(PNN)}{3}$$

- $Fd_i$  Se denomina factor de diagnóstico.
- $Diag_i(MLP)$  Es el Diagnóstico de la red MLP para el rodamiento i.
- $Diag_i(RBF)$  Es el Diagnóstico de la red RBF para el rodamiento i.
- $Diag_i(PNN)$  Es el Diagnóstico de la red PNN para el rodamiento i.



$$Diag_i(SH) = \begin{cases} 0 & \text{si } Fd_i > 0.5 \\ 1 & \text{si } Fd_i < 0.5 \end{cases}$$

**G1:** Los mejores índices de clasificación son alcanzados para las condiciones de Rodamiento Normal a todas las velocidades, y Rodamiento con defecto en Pista Interna a altas revoluciones.

Las condiciones de Rodamiento con defecto en Bola y Rodamiento con defecto en Pista Externa, también presentan índices de éxito iguales o superiores a los alcanzados por las redes MLP, RBF y PNN de manera individual.

Estos índices de clasificación individuales, afectan positivamente al índice general de clasificación, que resulta del promedio de las cuatro condiciones de rodamientos, a las tres velocidades estudiadas, y que alcanza un 83.33% para los rodamientos del grupo G1 clasificados con el Sistema Híbrido propuesto.

**G2:** Para el caso de los rodamientos pertenecientes al grupo de datos G2, que han sido clasificados con el Sistema Híbrido propuesto, presentan un índice general de clasificación de un 87.86%, para todas las velocidades y condiciones estudiadas. La condición de Rodamiento Normal se clasifica a un 100% de efectividad a todas las velocidades, mientras que la condición Rodamiento con defecto en Pista Interna posee alta efectividad a altas revoluciones. Por otra parte, la condición Rodamiento con defecto en Bola y con defecto en Pista Interna, logran clasificarse mejor a bajas revoluciones.

**G3:** Para el caso de los rodamientos pertenecientes al grupo de datos G3, que han sido clasificados con el Sistema Híbrido propuesto, presentan un índice general de clasificación de un 88.78%, para todas las velocidades y condiciones estudiadas.

La condición de Rodamiento Normal se clasifica a un 100% de efectividad a todas las velocidades, mientras que la condición Rodamiento con defecto en Pista Interna posee alto rendimiento a altas revoluciones. Por otra parte, la condición Rodamiento con defecto en Bola y con defecto en Pista Interna, logran clasificarse mejor a bajas revoluciones.



### 3.4. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE SISTEMAS CLASIFICADORES

Los resultados de las cuatro metodologías propuestas son los siguientes:

Grupo	Neuronas en capa Oculta	600 RPM	Neuronas en capa Oculta	1200 RPM	Neuronas en capa Oculta	1800 RPM
G1	30	76.67	30	61.68	30	73.33
G2	30	84.29	30	72.86	30	73.57
G3	30	85.71	30	81.63	30	77.04

Tabla 9.32.- Resultados Generales de la Clasificación con redes MLP.

Grupo	Neuronas en capa Oculta	600 RPM	Neuronas en capa Oculta	1200 RPM	Neuronas en capa Oculta	1800 RPM
G1	100	90	70	75	100	90
G2	90	80	70	77.14	100	82.14
G3	100	84.18	100	75.71	100	74.49

Tabla 9.33.- Resultados Generales de la Clasificación con redes RBF.

Grupo	Neuronas en capa Oculta	600 RPM	Neuronas en capa Oculta	1200 RPM	Neuronas en capa Oculta	1800 RPM
G1	1200	83.33	1200	77.77	1200	73.33
G2	2800	85.71	2800	85	2800	84.29
G3	3920	88.78	3920	84.49	3920	81.12

Tabla 9.34.- Resultados Generales de la Clasificación con redes PNN.

Grupo	Neuronas en capa Oculta	600 RPM	Neuronas en capa Oculta	1200 RPM	Neuronas en capa Oculta	1800 RPM
G1	-	86.7	-	78.3	-	85
G2	-	87.9	-	87.1	-	88.6
G3	-	91.3	-	90.8	-	84.2

Tabla 9.35.- Resultados Generales de la Clasificación con Sistemas Híbridos.

**Evolución de las cuatro metodologías utilizadas en los distintos grupos:**

Como se observa en la figura 9.32, la clasificación resulta superior a velocidades de rotación de 600 y 1800 RPM, y el Sistema Híbrido se ve superado por la red RBF a esas velocidades de giro.

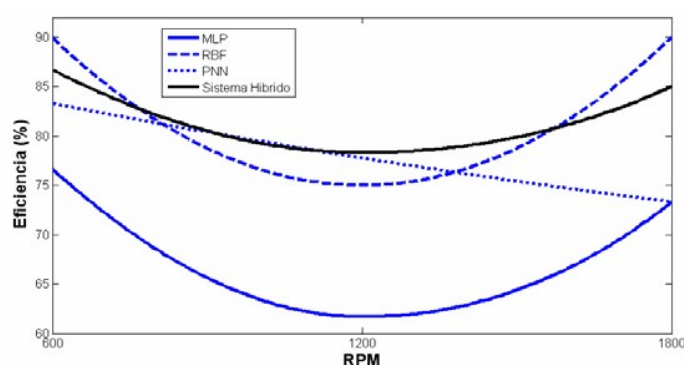


Figura 9.32.- Evolución de la clasificación general del grupo G1.

En el caso de la figura 9.33 se observa un mejor comportamiento del Sistema Híbrido de clasificación, obteniendo casi un 89% a 1800 RPM. A pesar de esto, a bajas revoluciones, el proceso presenta mejores tasas de éxito en general, en gran parte debido a que a altas revoluciones, las redes MLP presentan rendimiento pobre.

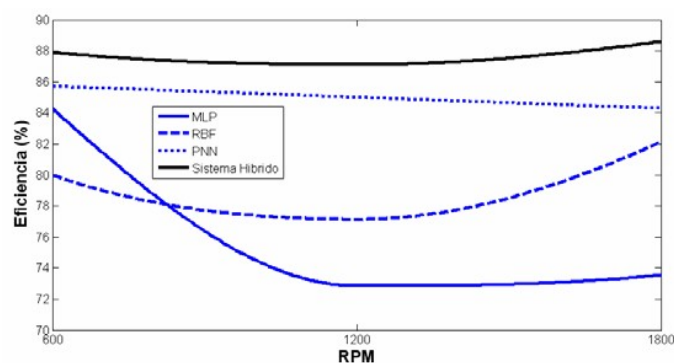


Figura 9.33.- Evolución de la clasificación general del grupo G2.

Por último, para el grupo de datos G3, se evidencia que a bajas revoluciones el comportamiento es mejor para todas las metodologías de clasificación utilizadas. Adicionalmente, se observa que el Sistema Híbrido presenta un comportamiento superior que cualquier otro clasificador.

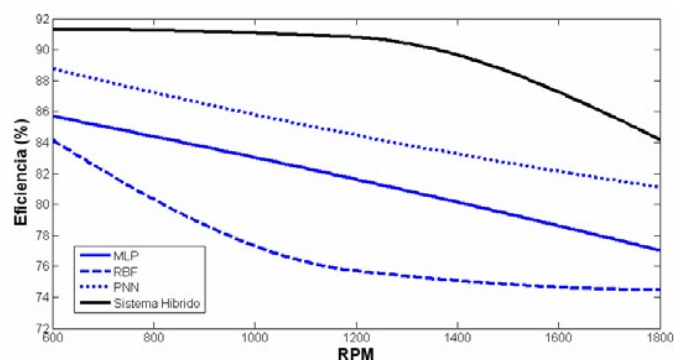


Figura 9.34.- Evolución de la clasificación general del grupo G3.

Por tanto, se puede concluir que los mejores resultados se dan con el método híbrido.

#### 4. CONCLUSIONES

1.- Se ha obtenido un sistema de señales experimentales representativo de cada condición en estudio, las cuales son: Rodamientos Normales, Rodamientos con defecto en Pista Interna, Rodamientos con defecto en su Bola y Rodamientos con defecto en Pista Externa.

2.- Se ha demostrado que el procesamiento de señales por medio de la DWT-MRA ofrece rasgos muy relevantes de la señal en estudio, logrando concentrar en pocos coeficientes la información relativa a la condición de cada rodamiento dado, y que luego logra ser clasificado con distintos tipos de red neuronal con altos porcentajes de eficiencia, superiores a los alcanzados por otros trabajos en el mismo campo.

3.- Se han generado tres métodos diferentes de diagnóstico, esquematizados en la figura 9.35, basados principalmente en técnicas avanzadas de análisis espectral de señales vibratorias, por medio de la Transformada Wavelet Discreta, y de su clasificación posterior con redes neuronales artificiales. De manera general, estas metodologías se ven afectadas por la complejidad de la red, la cantidad de patrones de entrenamiento y la velocidad de giro del rodamiento durante la adquisición de la medida.

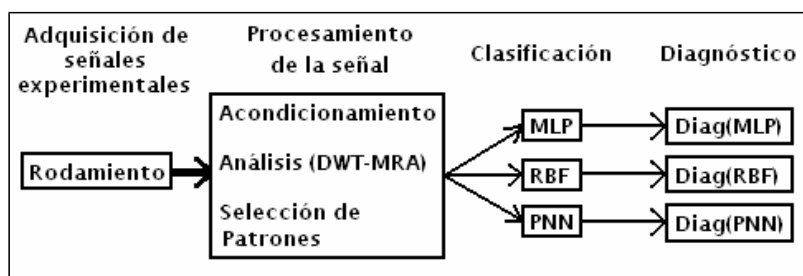


Figura 9.35.- Esquema general de metodologías de diagnóstico de defectos basadas en redes neuronales individuales.

3.a.- La metodología basada en la clasificación y diagnóstico por **redes de tipo MLP**, obtiene su mejor tasa de clasificación (85.71%) con señales adquiridas a 600 RPM, en redes con alta complejidad (30 neuronas en la capa oculta), y con mayor número de patrones de entrenamiento (grupo G3). Para esa misma red, se obtiene un 100% de tasa de clasificación para Rodamientos Normales, un 61.22% para Rodamientos con defecto en su Pista Interna, 100% para Rodamientos con defecto en su Bola, y 81.63% para Rodamientos con defecto en su pista Externa. Para las redes tipo MLP, los parámetros de tasa de aprendizaje ( $\alpha$ ) y coeficiente de momento ( $\eta$ ), no afectan la eficiencia de la red a partir de un valor de 0.05 y 0.03, mientras que si afectan la rapidez del entrenamiento.

3.b.- La metodología basada en la clasificación y diagnóstico por **redes de tipo RBF**, obtiene su mejor tasa de clasificación (84.18%) con señales adquiridas a 600 RPM, en redes con alta complejidad (100 neuronas en la capa oculta), y con mayor número de patrones de entrenamiento (grupo G3). Para esa misma red, se obtiene un 100% de tasa de clasificación para Rodamientos Normales, un 36.73% para Rodamientos con defecto en su Pista Interna, 100% para Rodamientos con defecto en su Bola, y 100% para Rodamientos con defecto en su pista Externa. Para las redes tipo RBF, el parámetro de anchura de base radial ( $d$ ) resulta crítico para una clasificación satisfactoria, y tiene que ser obtenido un valor óptimo antes de comenzar cualquier tarea de clasificación. Para esta metodología basada en redes RBF, se han tomado valores de  $d$  entre  $[0, 3]$ , para los cuales han sido obtenidos valores óptimos dentro del rango  $[0.22, 0.74]$ , para el conjunto total de redes RBF desarrolladas e implementadas. La principal ventaja de las redes RBF con respecto a las redes MLP, radica en su menor tiempo de entrenamiento

3.c.- La metodología basada en la clasificación y diagnóstico por **redes de tipo PNN**, obtiene su mejor tasa de clasificación (88.78%) con señales adquiridas a 600 RPM, en redes con alta complejidad (3920 neuronas en la capa oculta), y con mayor número de patrones de entrenamiento (grupo G3). Para esa misma red, se obtiene un 100% de tasa de clasificación para Rodamientos Normales, un 81.63% para Rodamientos con defecto en su Pista Interna, 81.63% para Rodamientos con defecto en su Bola, y 91.84% para Rodamientos con defecto en su pista Externa. Al igual que con las redes tipo RBF, para una clasificación satisfactoria con redes tipo PNN, el parámetro de anchura de base radial ( $d$ ) también resulta crítico. Para esta metodología basada en redes PNN, se han tomado valores de  $d$  entre  $[0, 1]$ , para los cuales han sido obtenidos valores óptimos dentro del rango  $[0.01, 0.08]$ , para el conjunto total de redes PNN desarrolladas e implementadas.

3.d.- Los niveles de profundidad y desarrollo presentados en 3.a, 3.b y 3.c no han sido presentados en ningún trabajo elaborado por otro autor. Adicionalmente, en trabajos similares con defectos incipientes, tampoco se han alcanzado porcentajes de éxito tan elevados. Estos resultados se apoyan en la diversidad de clasificadores evaluados y su optimización, a través del análisis experimental.

3.e.- La metodología de clasificación absoluta propuesta en la Tesis Doctoral permite que la efectividad se mida en rodamientos clasificados correctamente, y no en señales de medida clasificadas. Este esquema valora mucho más la repetición del diagnóstico y permite evaluar continuamente el estado dinámico del sistema, percibiendo el cambio de un estado “sin defecto” a otro defectuoso, con suficiente antelación.

3.f.- En líneas generales, la complejidad de la red neuronal mejora el proceso de clasificación, en todas las redes estudiadas. Algunas redes son capaces de producir alguna particularidad, pero a nivel global, las redes presentan un mejor comportamiento a mayor complejidad de su estructura.

3.g.- Las señales adquiridas a una velocidad de giro de 600 RPM presentan un mejor comportamiento en el proceso de clasificación que las adquiridas a 1200 y 1800 RPM. Esto se explica debido a que a bajas velocidades de rotación es mucho más estable la señal de vibración.

3.h.- Para las redes de tipo MLP y RBF, el defecto en pista interna del rodamiento es difícilmente detectable a bajas revoluciones, mientras que a altas revoluciones se dificulta la clasificación de defectos en pista externa. Las redes RBF presentan un problema adicional, debido a que a una velocidad de 1200 RPM es prácticamente imposible detectar un defecto en bola. A bajas revoluciones (600 RPM), la señal correspondiente a los rodamientos con defecto en pista externa, presenta una mayor amplitud de vibración que la señal correspondiente a los rodamientos con defecto en pista interna. Sin embargo a altas revoluciones (1800 RPM) ocurre el proceso contrario, siendo la señal correspondiente a los rodamientos con defecto en pista interna la que presenta una mayor amplitud. Esto hace que el defecto en pista interna sea notorio a altas revoluciones, y que el defecto en pista externa lo sea a bajas revoluciones, lo que hace que la red neuronal se comporte en consecuencia, clasificando con mayor eficiencia la condición más notoria: de defecto en pista interna a altas revoluciones, y defecto en pista externa, a bajas revoluciones.

4.- Se ha desarrollado y aplicado de un Sistema Clasificador Híbrido, como alternativa a los métodos de diagnosis de defectos basados en redes neuronales sencillas. Se ha generado un sistema que involucra a los tres tipos de redes estudiadas (MLP, RBF y PNN), en una metodología ilustrada por la figura 9.36.

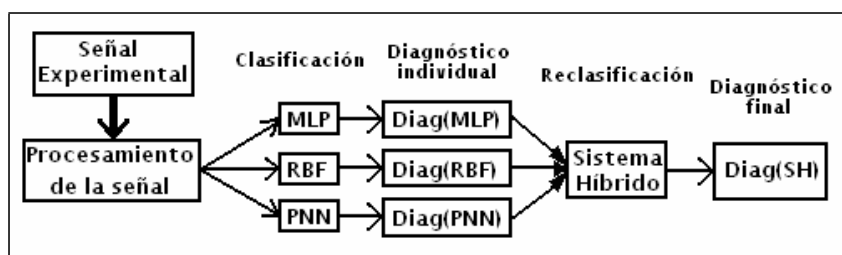


Figura 9.36.- Esquema general de la metodología de diagnosis de defectos basada en sistemas híbridos de clasificación.

4.a.- La metodología de diagnóstico basada en sistemas clasificadores híbridos obtiene su mejor tasa de clasificación (91.33%) con señales adquiridas a 600 RPM, y con mayor número de patrones de entrenamiento (grupo G3). Para esa misma red, se obtiene un 100% de tasa de clasificación para Rodamientos Normales, un 65.3% para Rodamientos con defecto en su Pista Interna, 100% para Rodamientos con defecto en su Bola, y 100% para Rodamientos con defecto en su pista Externa. Esta metodología ofrece tasas de clasificación superiores a las proporcionadas por los sistemas de diagnóstico basados en redes neuronales sencillas, a excepción de aquellas que trabajan con poca cantidad de datos, en las que las redes RBF son más eficientes. Cabe destacar que, los sistemas clasificadores híbridos alcanzan mayor eficiencia en cuanto más patrones de entrenamiento manejan las redes neuronales que lo componen.

## **5. OTRAS APORTACIONES**

Siendo un trabajo tremendamente interesante y completo, y cuyas conclusiones se pueden usar en otros ámbitos, esta Tesis se desarrolla exclusivamente en el campo de los rodamientos.

## **6. FUTUROS DESARROLLOS**

Como futuros desarrollos o posibles líneas de investigación se enumeran:

- La aplicación de estas nuevas metodologías a otras partes rotativas, para mejorar los índices de clasificación obtenidos en otros campos similares. Es conocido que se han realizado trabajos con la Transformada Wavelet para la extracción de patrones en otros sistemas mecánicos, como engranajes con defectos o ejes flexibles con fisuras. Sería factible utilizar el Análisis Multirresolución para la obtención de los patrones de entrenamiento y utilizar alguno de los clasificadores propuestos.
- La optimización del proceso de selección de patrones a través de otros niveles de descomposición en el Análisis Wavelet, ó de un algoritmo de automatización para la selección de coeficientes que resulten más óptimos en la posterior clasificación. Adicionalmente, se pueden plantear otros métodos que consigan disminuir el ruido de la señal antes de su entrada en la red neuronal.
- La utilización de otros métodos de clasificación para el proceso de diagnóstico, como los Algoritmos Genéticos (GA), los Mapas Autoorganizados (SOM) ó las Redes de Lógica Borrosa (FLN). Las redes neuronales utilizadas en la Tesis Doctoral han arrojado buenos



resultados, sin embargo son una pequeña parte del total de sistemas de clasificación disponibles, por lo que otras técnicas deben ser estudiadas, tanto para las metodologías que implican una red neuronal individual, como para aquellas que alimentan a un Sistema Híbrido de clasificación.

- La evaluación de las metodologías propuestas con diferentes grados de defecto en los rodamientos. Aunque se han tomado unas dimensiones definidas para los defectos en pista interna (espesor de grieta= 2 mm) y pista externa (espesor de grieta=5 mm), es posible incorporar nuevos rodamientos con diferente grado de defecto.
- Es posible determinar una velocidad óptima de clasificación. A través de análisis experimentales, se puede evaluar la metodología propuesta con velocidades de giro en un rango de valores más amplio. Esta velocidad óptima de giro del rodamiento, puede ser aplicada al diseñar una metodología de diagnóstico para un sistema mecánico en particular.



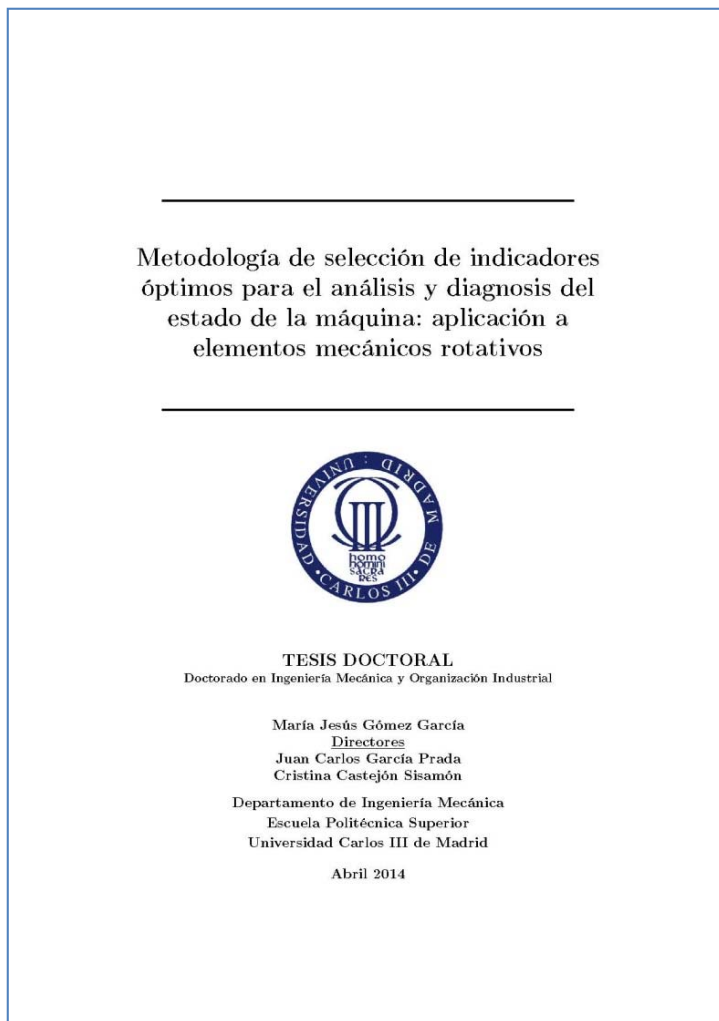


## **TEMA 10:**

**TESIS DOCTORAL DE MARÍA JESÚS GÓMEZ  
GARCÍA**



La última tesis doctoral que vamos a considerar, la más actual, pertenece a María Jesús Gómez García. El título de la misma es: “Metodología de selección de indicadores óptimos para el análisis y diagnóstico del estado de la máquina: aplicación a elementos mecánicos rotativos”. Está fechada en Abril 2014.



Aunque el desarrollo del trabajo se ha efectuado para el estudio de la defectología en ejes, debido a los buenos resultados obtenidos, se han usado los datos de la tesis doctoral de Omar José Lara Castro para validar los resultados para su uso en rodamientos.

En las siguientes secciones se explicarán tanto el procedimiento para la obtención de las señales, como las dos aproximaciones utilizadas y sus resultados.

## **1. CONDICIONES DE MEDICIÓN Y RODAMIENTOS UTILIZADOS**

Los datos de utilizados en este trabajo se tomaron de la Tesis Doctoral de Omar José Lara Castro.

### **RODAMIENTOS**

Los rodamientos ensayados fueron rodamientos de bolas FAG 7206 B.

### **DEFECTOS**

Hay cuatro tipos de condiciones o “clases” del sistema experimental:

- (i) Rodamientos en condiciones normales (N).
- (ii) Rodamientos con defecto en pista interna (I). *Espesor: 2mm.*
- (iii) Rodamientos con defecto en bola (B). *Múltiples ralladuras*
- (iv) Rodamientos con defecto en pista externa (E). *Espesor: 5 mm.*

### **BANCO DE ENSAYOS**

Las señales vibratorias fueron obtenidas de un banco de ensayos perteneciente al Departamento de Ingeniería Mecánica de la UNED. Se muestra en la figura 10.1.



**Figura 10.1.- Banco de ensayos utilizado para la toma de medidas. Laboratorio de la UNED.**

Los primeros elementos observados, de derecha a izquierda, son cilindros neumáticos axiales y radiales, que aplican cargas de 2,5 y 3 bares respectivamente. A continuación se

puede observar el montaje de los rodamientos. La transmisión se realiza mediante una correa conectada al motor.

## CONDICIONES DE MEDICIÓN

La frecuencia de muestreo utilizada fue de 5.000Hz, y cada señal adquirida tiene 5.120 puntos.

Finalmente, se obtuvieron 588 señales, 196 por cada velocidad, y 49 para cada condición de fallo (rodamiento sano, defecto pista interna, defecto pista externa, defecto bola).

Estas señales han sido utilizadas previamente para el diseño de otros sistemas de diagnóstico, basados en MRA (análisis multirresolución).

## **2. TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO**

Para el diagnóstico de rodamientos se utiliza como patrón la energía WPT (transformada en paquetes Wavelet), debido a los buenos resultados arrojados en ejes. Por lo tanto, el estudio se centra en seleccionar los parámetros locales óptimos de la señal.

En este caso, las frecuencias teóricas de fallo son bien conocidas, por lo que no será necesario realizar un modelo teórico. Por tanto, en una primera aproximación se seleccionarán como posibles patrones válidos la energía de los paquetes que contengan las frecuencias teóricas de fallo.

Para la segunda aproximación, también análogamente a los ejes, se utilizará la energía obtenida mediante WPT de las señales a distintos niveles de descomposición, y con ellas se alimentarán distintas redes neuronales.

El proceso que ofrezca mejor diagnóstico se seleccionará como óptimo.

## **3. ENSAYOS REALIZADOS**

### **1. Primera Aproximación: Análisis de las energías WPT de las frecuencias teóricas de fallo**

En esta primera aproximación, se recurre a las frecuencias de fallo teóricas para la selección de parámetros locales mediante la primera aproximación. Estas frecuencias dependen de la configuración del rodamiento y de la velocidad de rotación.

Para los defectos inducidos, que son el defecto en pista interna, en pista externa y en bola, las frecuencias teóricas de fallo corresponden a las ecuaciones BPFI, BPFR y BPFO. Para el caso de los rodamientos FAG 7206 B, las frecuencias de fallo son:

Tipo de fallo	Frecuencia (Hz)		
	10Hz	20Hz	30Hz
<b>BPFI</b>	75,39	150,78	226,17
<b>BPFR</b>	46,69	93,38	140,07
<b>BPFO</b>	54,60	109,21	163,83

Tabla 10.1.- Frecuencias de fallo de los rodamientos FAG 7206 B.

Utilizando una Wavelet madre db6, y un nivel de descomposición 9, se calcula la WPT y posteriormente las energías. Los paquetes que contienen las frecuencias teóricas de fallo son seleccionados directamente para un análisis previo.

Comparando las energías de los paquetes seleccionados para rodamiento sano y defectuoso, no se observa que los datos puedan ser separables estableciendo un valor umbral para ningún caso de defecto ni de velocidad.

Debido al fracaso de este primer método, se recurre a entrenar una serie de redes neuronales utilizando los coeficientes de la WPT (un total de 11) de los paquetes seleccionados. Los resultados en este caso tampoco son buenos, y no se obtiene ninguna red con una tasa de acierto global mayor del 50 %.

A la vista de los resultados, se puede afirmar que, en este caso, ni la energía ni los coeficientes de la WPT de las frecuencias teóricas de fallo pueden ser utilizados para establecer un método de diagnóstico fiable.

## 2. Segunda Aproximación: Análisis global de la energía WPT de las señales experimentales

Como segunda aproximación para la selección de parámetros locales de la WPT de la señal se utilizará el mismo método que para ejes: las energías obtenidas mediante WPT a distintos niveles de descomposición (del 2 al 9) serán los patrones de entrada para los entrenamientos de distintas redes neuronales de arquitectura RBF (función de base radial).

Se diferenciará entre niveles de descomposición altos y bajos: para los bajos, se tomarán todos los paquetes generados, y para los altos, la combinación de los 10 que presentan las máximas diferencias para condición de fallo, de forma análoga al caso de ejes.

### 3. Diseño del sistema de clasificación: redes neuronales RBF

En el caso de los rodamientos, las redes se entrenarán con cuatro salidas diferentes, debido a que se obtienen muy buenos resultados, y son capaces de distinguir entre los diferentes tipos de defecto analizados.

De forma análoga al caso de ejes, se buscará una configuración óptima de las redes RBF para cada velocidad, de forma que haya un sistema de clasificación para cada una que sepa distinguir entre los patrones que provienen de rodamientos sanos y de cada tipo de defecto analizado.

En la tabla 10.2 se muestran los parámetros comunes para los entrenamientos de las redes.

Normalización de valores de entrada	En [-1;1]	
Tipo de aprendizaje	Supervisado	
Número de salidas	4	
Normalización de los valores de salida	[-1,1]	
Distribución de datos de entrada	Training	75 %
	Test	25 %
	Goal	0,1-0,2
Criterio de parada	Neuronas en la capa oculta	700
<i>Spread</i>	0,2-2	

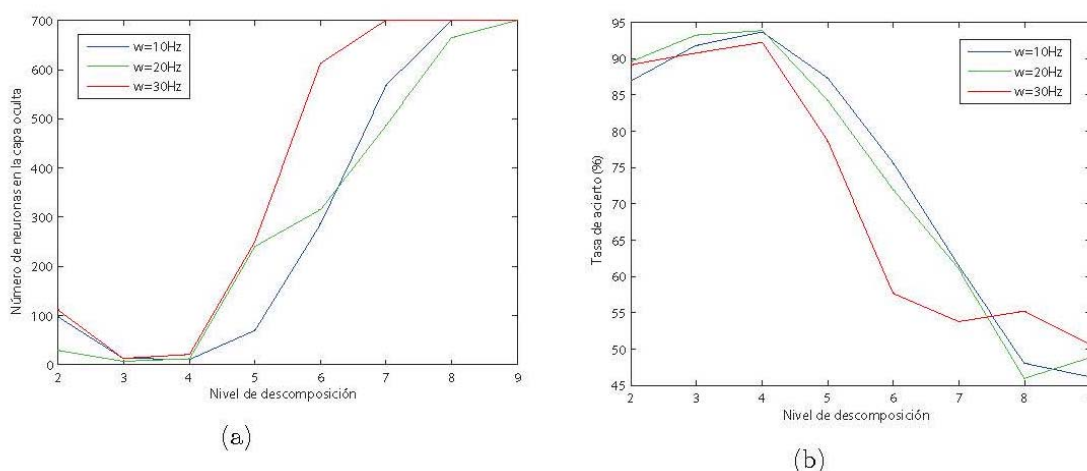
Tabla 10.2.- Constantes utilizadas para el diseño de RBFs en rodamientos.

### 4. Resultados

Una vez optimizado el valor de *spread* para cada condición de velocidad y nivel de descomposición, se dispone de un total de 24 redes neuronales optimizadas, 8 para cada velocidad.

En la figura 10.2 se presentan tanto los resultados de número de neuronas en la capa oculta obtenidos, que son un claro indicador del coste computacional para el entrenamiento de las redes, como las tasas de acierto. Se presentan en la figura en función del nivel de descomposición utilizado.





**Figura 10.2.- Gráficas para la selección del valor de descomposición óptimo para el caso de rodamientos:**  
**(a) Número de neuronas en función del nivel de descomposición. (b) Tasas de acierto obtenidas en función del nivel de descomposición.**

Como se puede observar en las gráficas, el nivel de descomposición 4 parece ser el óptimo para todas las velocidades, ya que maximiza las tasas de acierto y minimiza el número de neuronas en la capa oculta.

Una vez conocido este valor, y el de *spread* óptimo para cada caso de velocidad, se vuelven a entrenar las mismas redes utilizando en este caso un valor máximo admisible de error para el entrenamiento (*goal*) de 0,1.

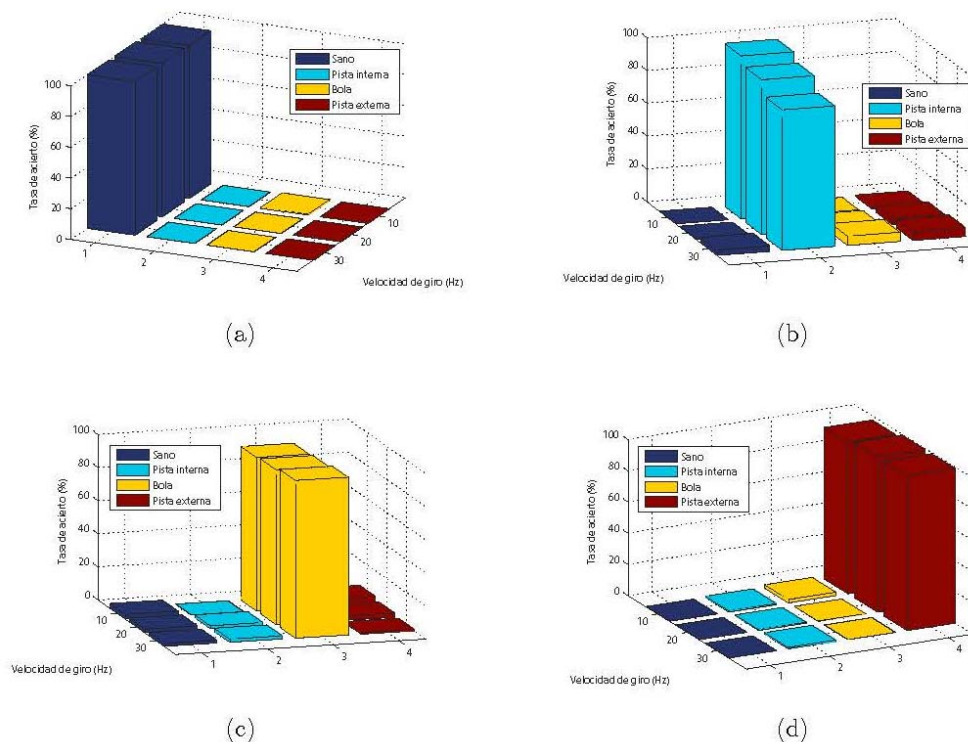
Los resultados obtenidos para cada caso de velocidad, se muestran en la tabla:

Velocidad (Hz)	Neuronas en la capa oculta	Tasa de acierto ( %)
10	60	97,13
20	87	97,26
30	145	95,74

**Tabla 10.3.- Resultados obtenidos para un *goal* de 0,1.**

Como se puede observar, las tasas de acierto se han mejorado al utilizar un valor menor para el *goal*; sin embargo, el coste computacional ha aumentado.

En este caso, como la red cuenta con 4 salidas, los resultados se presentarán en cuatro gráficos distintos. En cada uno de ellos, se presentarán las salidas de la red cuando a la entrada se le proporcionan cada una de las cuatro condiciones distintas: rodamiento sano, rodamiento con defecto en pista interna, en bola, y en pista externa. En la figura 10.3 se presentan estos resultados parciales de clasificación.



**Figura 10.3.- Tasa de acierto (%) para las tres redes entrenadas a las distintas velocidades (Hz):**  
(a) Clasificación de un rodamiento sano (b) Clasificación de un rodamiento con defecto en pista interna.  
(c) Clasificación de un rodamiento con defecto en bola (d) Clasificación de un rodamiento con defecto en pista externa.

#### **4. CONCLUSIONES**

La transformada Wavelet ha tomado mucha importancia en los últimos años para la diagnosis de rodamientos. Esta herramienta ha sido utilizada en numerosos trabajos, combinada con sistemas de clasificación inteligente.

En este trabajo se aplicaron dichas técnicas originariamente en ejes, y con el fin de generalizar los métodos de diagnosis propuestos, se aplicaron las mismas técnicas para rodamientos, utilizando señales vibratorias obtenidas a tres velocidades diferentes (10, 20 y 30Hz), y en cuatro condiciones distintas: rodamiento sano, con defecto en pista interna, con defecto en bola, y en pista externa.

Debido a los buenos resultados en ejes, para la diagnosis de rodamientos se ha recurrido directamente al análisis de la energía WPT. Por tanto, el estudio se ha centrado en la selección de los parámetros locales de la señal.

En la primera aproximación se utilizaron las energías WPT de las bandas de frecuencia que contenían las frecuencias teóricas de fallo; pero no se han conseguido resultados de detección fiables.

Mediante la segunda aproximación, utilizando las redes neuronales, sí se obtuvieron buenos resultados de clasificación, siendo la distinción entre tipos de fallo además es muy precisa.

En este caso, aunque el nivel de descomposición óptimo en ejes era el 5, en rodamientos resulta ser el 4.

Además, los resultados de las redes que utilizan todos los paquetes para el entrenamiento ofrecen mejores diagnósticos que las que utilizan sólo algunos. Por tanto, los efectos producidos por un defecto son más visibles mediante el análisis de todo el rango de la señal que con el de determinadas bandas finas.

Respecto a los resultados obtenidos, la probabilidad de no detectar un defecto es muy baja en los tres casos, obteniendo los mejores resultados a 10 y 20 Hz, donde aunque en algunos casos los defectos se confundan con otros, solamente en 2 % de las ocasiones se diría que un rodamiento defectuoso está sano. Además, a 20 y 30 Hz no existe ninguna falsa alarma, y para el caso de 10 Hz solamente un 0,5 %.

Por tanto, como conclusión final, aunque los resultados óptimos se obtienen a 20 Hz, a las tres velocidades permite una detección muy fiable de defectos incipientes en rodamientos, y no solamente detecta los defectos sino su localización.

## **5. OTRAS APORTACIONES**

La principal aportación de la Tesis es el desarrollo de una metodología general para detectar defectos en elementos mecánicos rotativos, ya que las técnicas propuestas han sido validadas experimentalmente tanto en su aplicación a rodamientos como a ejes.

Sus principales aportaciones han sido:

- La selección y utilización de la energía de la señal vibratoria, procesada mediante la transformada en paquetes Wavelet (WPT), como patrón óptimo para detectar defectos en elementos mecánicos rotativos. Se presenta un estudio detallado del patrón para esta utilidad. Además, en este trabajo se prescinde de la normalización que usualmente se aplica para calcular este parámetro, donde las energías son relativas respecto a la energía

global de la señal vibratoria. Las energías de la WPT utilizadas en este trabajo se presentan en valores absolutos.

- Para el caso de ejes, se ha desarrollado un método de diagnosis fiable, comprobado experimentalmente, a partir de los cambios de energía en el tercer armónico de la velocidad de giro ( $3x$ ). En la bibliografía, tradicionalmente se han utilizado las frecuencias  $1x$  y  $2x$  (armónicos de la velocidad de giro), con resultados poco fiables en la práctica. Como aportación adicional, se ha establecido una correlación entre los valores del patrón y el tamaño del defecto.
- El uso de las energías de la WPT para la extracción de patrones ha permitido el desarrollo de un proceso automático para detectar las bandas de frecuencia, o paquetes, que presentan mayores cambios de energía cuando aparece un defecto. Este método está basado en la utilización de redes neuronales, que permiten seleccionar los parámetros (tanto del nivel de descomposición de la WPT, como la disposición de los patrones) con los que se consiguen los mejores resultados de clasificación.

La ventaja principal de esta técnica es que está encaminada a realizar el diagnóstico durante el funcionamiento de la máquina.

## **6. FUTUROS DESARROLLOS**

Los futuros desarrollos o posibles líneas de investigación que se abren con esta Tesis Doctoral son:

- El análisis y optimización de la transformada de Hilbert-Huang como posible patrón, para ver si puede ofrecer mejores resultados que la transformada Wavelet.
- Aunque las redes neuronales han ofrecido muy buenos resultados, sería conveniente explorar todo el campo disponible de sistemas de clasificación (algoritmos genéticos, máquinas de soporte vectorial o lógica borrosa) con el fin de verificar si alguno de ellos pudiera arrojar mejores resultados.
- El análisis de un rango más amplio de defectos. El método de diagnosis propuesto en el caso de ejes detecta incluso el defecto más pequeño analizado, aunque sería muy interesante analizar cuál es el defecto más pequeño que puede ser detectado con fiabilidad por este método.
- Determinar si la misma red neuronal sería capaz de identificar defectos que se encuentren otras posiciones del eje, o sería necesario realizar nuevos entrenamientos.



- Realizar un estudio sobre la influencia de la carga. Lo normal es que la aplicación de una carga amplifique las manifestaciones de los defectos, mejorando así los resultados de diagnosis, aunque sería conveniente comprobar experimentalmente este hecho.
- Ampliar el rango de velocidades estudiado. De esta manera, se podría observar cuál es el valor de velocidad óptima para la clasificación.
- El análisis de la vibración en otras direcciones diferentes de la vertical, para comprobar si los resultados obtenidos pueden ser mejorados.
- La integración de la metodología general propuesta en una interfaz gráfica que permitiera la diagnosis en tiempo real para un operario no experto.
- La validación de la metodología general propuesta sobre otro tipo de elementos mecánicos como engranajes y cajas de cambios fisurados.
- La integración de la diagnosis de varios elementos mecánicos en un único sistema clasificador que permita diagnosticar una maquinaria completa, distinguiendo posibles fallos entre sus distintos elementos.



## **TEMA 11:**

## **CONCLUSIONES**





Este proyecto tenía como objetivo principal: “Estudiar la evolución tecnológica en la identificación de averías en sistemas mecánicos”, lo que se ha realizado basándonos en los proyectos, y principalmente en las tesis que se han desarrollado en los últimos años en la Universidad Carlos III.

El interés que tiene el estudio de los métodos de diagnóstico del estado de los sistemas mecánicos es que presenta actualmente un gran interés industrial, puesto que indican la necesidad de intervenir o no en los sistemas para evitar problemas.

Aunque en este proyecto no se ha incluido en un capítulo independiente, sino como un anexo, como ya se ha indicado en distintos puntos del proyecto, la tesis que ha sido germen de las que nos aquí nos ocupa es la pertenece a Juan Carlos García Prada. Por esta circunstancia, nos parece conveniente explicarla antes que el resto de tesis.

La tesis de Juan Carlos García Prada fue publicada en 1.991, y el título de la misma es: “Análisis de armónicos según órdenes de rotación en sistemas mecánicos”. Tenía como objetivo fundamental establecer un método para la detección de fallos incipientes por rotura en los rodamientos de una máquina rotativa de dos apoyos. Para ello, se utilizan diversas técnicas estadísticas multivariantes (Análisis de Correlación, Cluster Analysis, Análisis Discriminante), precursores de los sistemas de clasificación inteligente que se desarrollaron después.

Las técnicas multivariable usadas son:

### **1. Análisis de grupos ("cluster analysis").**

El "cluster analysis" permite visualizar gráficamente la agrupación de las observaciones generados en los distintos ensayos en un espacio n-dimensional buscando la homogeneidad dentro del grupo y la heterogeneidad entre grupos diferentes.

Estas gráficas permiten localizar fenómenos y sus comportamientos. La vía gráfica no sustituye a la vía matemática, pero muchas veces simplifica las decisiones sobre nuevos tratamientos.

La visualización de las gráficas que genera el "cluster analysis" permite apreciar en una primera aproximación si las observaciones del mismo tipo se agrupan en ciertas zonas.

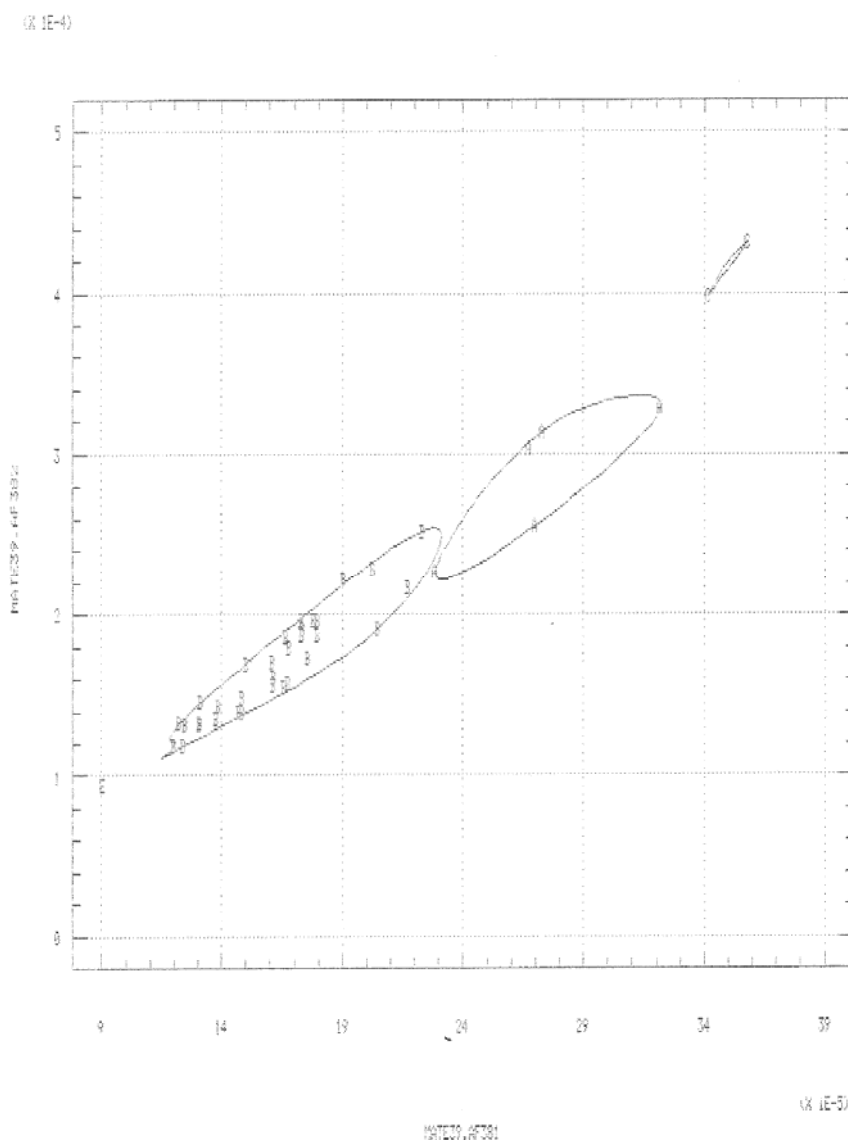


Figura 11.1.- Ejemplo de cluster analysis.

## 2. Análisis de la matriz de correlación.

De la matriz de correlación se obtienen las posibles relaciones de linealidad entre las variables del grupo, permitiendo reducir el número de variables de grupo y simplificar posteriormente el análisis discriminante.

## 3. Análisis discriminante.

El análisis discriminante permite clasificar las observaciones realizadas según una variable auxiliar de clasificación (en este caso la pertenencia o no a un tipo de defecto). Informa tanto gráfica como estadísticamente de la bondad de la clasificación y genera

varias funciones, denominadas discriminantes, combinaciones lineales de las variables en análisis.

El análisis discriminante tiene como principal objetivo la predicción de la pertenencia a un cierto grupo de los datos de una nueva observación, es decir buscar la combinación lineal de las variables que maximizan las diferencias entre grupos.

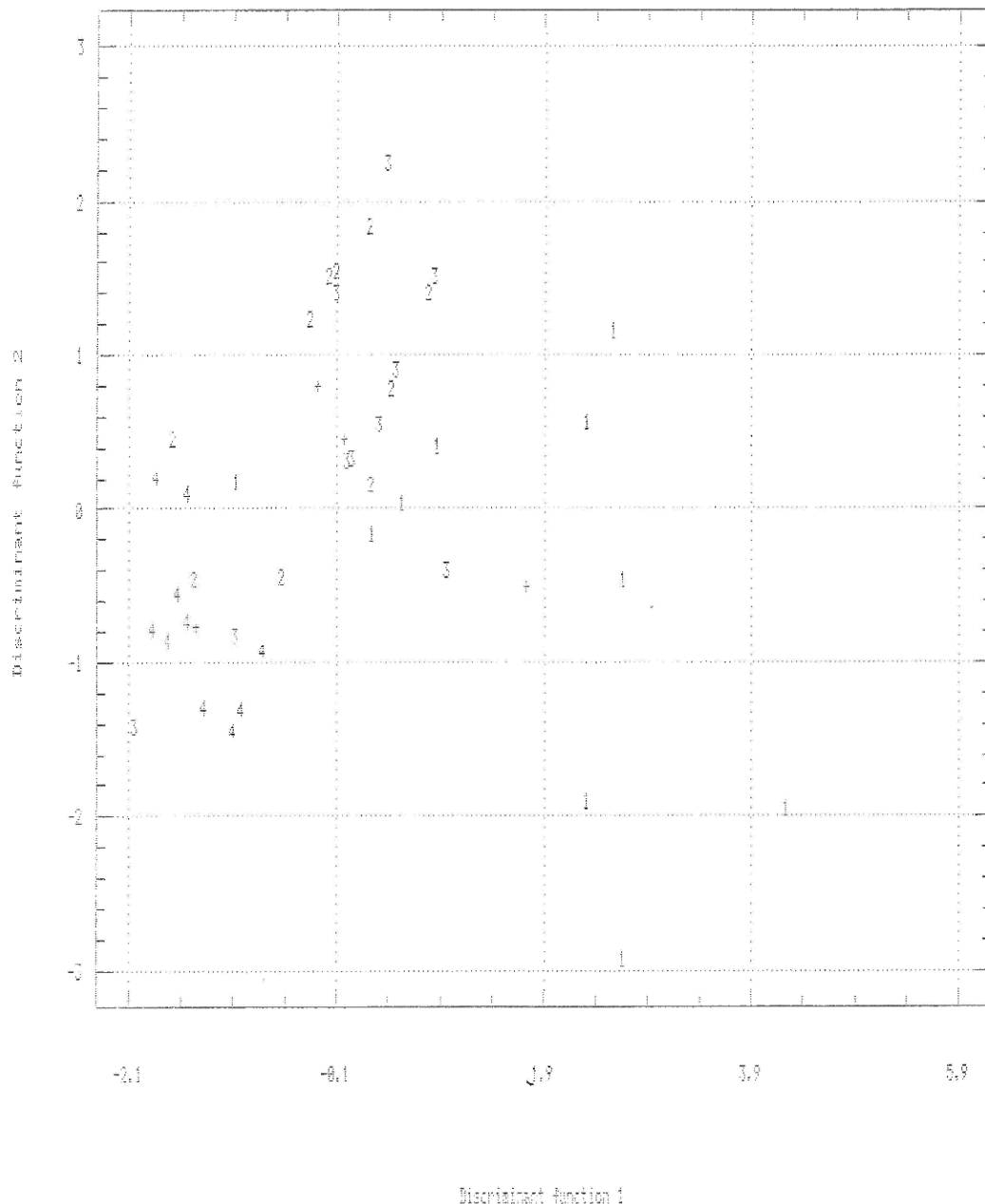


Figura 11.2.- Ejemplo de análisis discriminante.

Por último, otra de las grandes aportaciones de la tesis fueron las “tablas de eventos”.

Para la realización de las tablas de eventos espectrales se hará de la siguiente manera:

- Se dispondrán en abscisas los rodamientos numerados del 1 al 10; en ordenadas dispondremos los números de cuadro del 1 al 10, correspondiendo estos a cada una de los diez intervalos de frecuencia en que dividiremos la escala de frecuencias.
- Barreremos por rodamientos y para cada uno de ellos por cuadro obteniéndose un evento  $\ll 1 \gg$  cuando el espectro a comparar tenga una nueva línea espectral respecto al referencia y obteniéndose un evento  $\ll 0 \gg$  cuando lo anterior no se cumpla.

Los espectros referencia para los distintos ensayos serán en unos casos el correspondiente a la bancada sin rodamientos y en otros a la bancada con un rodamiento nuevo.

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	1	2	0	1	1	1	0	1	1	1
8	0	0	1	2	0	1	0	1	0	0
9	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 11.1.- Espectro rodamiento nuevo frente a espectro garra vacía.

Gracias a la información de la tabla, podemos saber en qué partes del espectro de frecuencias encontramos líneas espectrales.

Este tipo de tablas serán muy usadas en trabajos y estudios posteriores.

## **1. CONCLUSIONES POR CAPÍTULO**

Basándonos en la estructura de este proyecto, en cada capítulo se han sacado las siguientes conclusiones.

En la **introducción** se plantean los objetivos principales del trabajo, la motivación de dicho trabajo, la planificación que se lleva a cabo, y la estructura que se va a seguir en el resto del trabajo.

En el tema 1, **El mantenimiento Industrial**, se explica lo que significa el concepto de mantenimiento, los tipos principales que se han desarrollado a lo largo de la historia, desde el mantenimiento de Emergencia, pasando por las intervenciones planificadas preventivas o mejor aún, de la intervención por síntomas (mantenimiento predictivo), o cómo finalmente se está llevando a cabo el Mantenimiento Productivo Total (TPM), que involucra tanto a departamentos como Alta Dirección u operarios en el proyecto. Además se ha añadido un par de puntos para comparar el estado del mantenimiento en 1995 (fecha de la tesis), y los conceptos de mantenimiento que se manejan actualmente. Además, se ha considerado interesante añadir unas notas sobre el mantenimiento actualmente en España, con datos de 2010, y que reflejan el estado de las políticas de mantenimiento en las empresas de nuestro país.

Es interesante observar cómo los conceptos de mantenimiento no han cambiado mucho en los últimos años: puede haber un mayor control legislativo, los avances tecnológicos nos permiten controlar mayores variables o tener un mejor control sobre ellas...pero los conceptos de mantenimiento preventivo o predictivo sigue aún vigente. Realmente los últimos avances que se han dado han ido encaminados hacia temas más relacionados con la gestión de los recursos y del factor humano, antes que la creación de un nuevo tipo de mantenimiento.

Además, como ya hemos comentado, aunque en el proyecto se han tratado los tipos de mantenimiento por separado, en la empresa real es difícil que se dé un sólo tipo de mantenimiento; habitualmente tenemos un amalgama de distintas técnicas.

Por último, respecto al estado del Mantenimiento en España, es curioso cómo una situación como la crisis que está atravesando la economía de nuestro país, en general perjudica a las políticas de mantenimiento, cuando mayor provecho se puede sacar de ello, ya sea evitando cambios innecesarios, o pérdidas de energía (y por tanto, dinero) en desalineamientos o vibraciones innecesarias en las máquinas.

En el tema 2, **El mantenimiento predictivo y la técnica de análisis de vibraciones**, se han descrito las diferentes técnicas que se aplican para el mantenimiento predictivo, haciendo especial hincapié en las técnicas de análisis de vibraciones que nos va a ocupar este proyecto. Además, al final del capítulo se van a reflejar cronológicamente los principales hitos que se han producido en la historia en las técnicas de análisis de vibraciones, y las principales normativas que lo tratan.

En cuanto al mantenimiento predictivo, nos encontramos distintas técnicas, dependiendo la variable que quieran controlar (temperatura, partículas, vibración...). Aunque para este proyecto se ha elegido el análisis de vibraciones, por ser quizá la técnica más usada para la detección de defectos en sistema mecánicos, nuevamente, en la industria real nos podemos encontrar con el uso simultáneo de varias técnicas para el control de diferentes variables. Además, como hemos comentado en el punto anterior, esta técnica va a ser provechosa, además de para el mantenimiento, para la detección de desalineamientos y vibraciones en las máquinas que producen pérdidas de energía.

Respecto a la perspectiva histórica, se puede ver el desarrollo de las distintas técnicas de análisis de vibraciones a lo largo de los años. Como se puede ver, se han ido simultaneando las distintas técnicas en el tiempo.

En el tema 3, **Técnicas aplicables al análisis de vibraciones en 1995**, hemos descrito las distintas técnicas de análisis de señales de vibración que desarrolla Carlos José Roda Vázquez en su tesis. Además, hemos recibido el inestimable apoyo del PFC correspondiente a Higinio Rubio, desarrollado en ese mismo año. Con la información extraída de estos dos documentos, hemos tratado de hacer una panorámica del estado de la técnica en ese año. Por último, gracias a la información obtenida de artículos de la época y la inestimable ayuda de mi tutor, Juan Carlos García Prada, se ha hecho una breve reseña de los orígenes y primeras técnicas del análisis multivariable.

Como podemos ver, en el año 1995 las técnicas basadas en la frecuencia, tan importantes a día de hoy, ya se estaban iniciando, aunque no estaban plenamente desarrolladas y generaban errores. De hecho, aún se recurrían a otras técnicas en el dominio temporal o de la amplitud. A pesar de ello, se estaban asentando las bases de todo el desarrollo que ha venido después, y como muestra, los orígenes del análisis multivariable, tan usado actualmente.

En el tema 4, **Nuevas técnicas aplicables al análisis de señales de vibración**, se exponen las técnicas más usadas para la determinación de los defectos. Empezamos

describiendo las transformadas más sencillas, como son las de Fourier o Hilbert Huang, pasando por las transformadas Wavelet, para llegar a los sistemas más complejos, como son los análisis multirresolución (MRA) o las redes neuronales artificiales (RNA).

En este caso, como hemos descrito, pasamos de las transformadas más sencillas a los sistemas más complejos. Hay varios factores que han permitido estos avances en las técnicas de detección:

Por un lado, gracias a sus múltiples utilidades en distintos ámbitos, ha sido fundamental las aportaciones que han llevado a cabo otras disciplinas (medicina, industria,...) para el desarrollo de los sistemas clasificadores inteligentes y las redes neuronales.

Por otro lado, ha sido fundamental el desarrollo que se ha llevado a cabo en estos años de las herramientas informáticas, porque sin él, no hubiera sido posible procesar todos los datos e informaciones obtenidas, y por tanto no hubiera sido operativo poner en uso dichas técnicas.

En el tema 5, **Elaboración de los modelos teóricos de vibraciones en rodamientos**, exponemos en un primer lugar las características básicas de los rodamientos, los distintos tipos que nos podemos encontrar dependiendo de sus utilidades, y los rodamientos empleados en las tesis que nos ocupan, así como la caja de engranajes. Además, hacemos un pequeño estudio de la defectología en los rodamientos, los distintos tipos de defecto que nos podemos encontrar, el comportamiento vibratorio de un rodamiento, y los distintos estados por los que atraviesa un rodamiento dañado. Por último, hacemos una compilación de las principales características de los modelos de vibración por defectos en rodamientos, y una breve reseña histórica sobre su desarrollo.

Aunque sólo vamos a trabajar con un grupo reducido de rodamientos y de defectos, en este capítulo hemos visto todos los tipos de rodamientos y defectos que nos podemos encontrar, aunque en las tesis y nuestro proyecto no se hayan podido estudiar en su totalidad. Además, es de especial importancia estudiar el comportamiento vibratorio de los rodamientos y su espectro, puesto que va a ser fundamental en capítulos posteriores para la detección de defectos.



En el tema 6, **la tesis doctoral de Carlos José Roda Vázquez**, es la primera que se encaró en este proyecto, y es uno de los gérmenes del resto de tesis que han venido después.

Nos encontramos una tesis claramente enfocada por y para su aplicación industrial, y de hecho usa datos reales de una instalación real; en este caso, de la mina de Endesa en As Pontes.

Aunque en este proyecto sólo nos hemos fijado en la parte de rodamientos, la tesis desarrolla los procedimientos para reductores completos, incluyendo también engranajes. La tesis plantea los desarrollos completos dependiendo del tipo de defecto que nos encontremos, y al final de cada capítulo hay un perfecto resumen de la información y los procesos en los diagramas y gráficos.

En la parte de rodamientos que nos ocupa, usa medidas de la instalación real, medidas de un banco para reductores prototipo, y medidas de un banco de rodamientos.

Como hemos comentado, al ser una tesis enfocada directamente a la aplicación industrial, no nos va a importar tanto saber el tipo de defecto o la localización, sino que lo principal es saber simplemente si hay algún tipo de rodamiento dañado. Además, el primer gran esfuerzo que exige es realizar un estudio exhaustivo para localizar las frecuencias propias de la estructura y los elementos, para que no interfieran con las señales, y localizar las direcciones de medida más adecuadas.

La principal conclusión a la que se llega es que para identificar un defecto con un deterioro al menos del 2, se deben buscar elevaciones en el espectro de aceleración de las amplitudes alrededor de la frecuencia de resonancia del rodamiento deteriorado. Por tanto, para simplificar la técnica, es suficiente con controlar dicha banda de frecuencias.

Como vemos, esta conclusión que se extrae es muy genérica, y válida para cualquier tipo de defecto.

Además, son especialmente interesantes los modelos espectrales (firmas), que caben esperar para cada uno de los defectos analizados, (fig. 11.3).

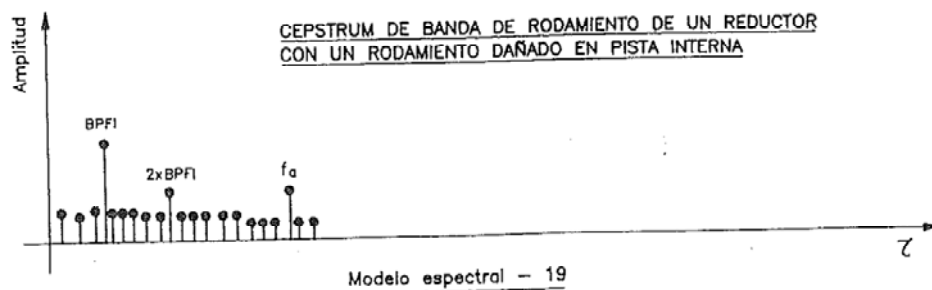
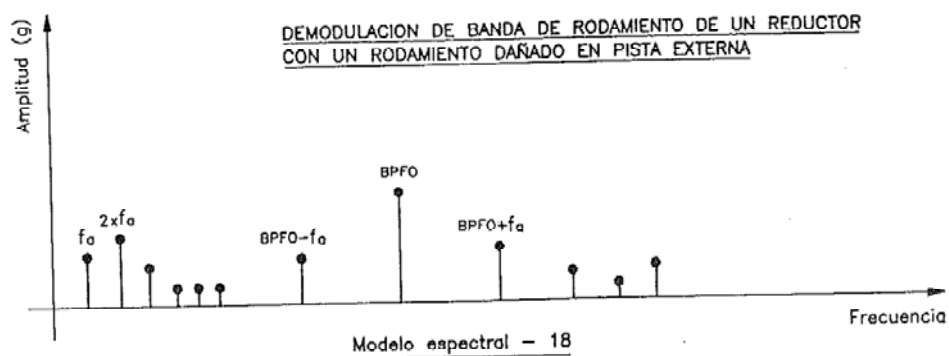
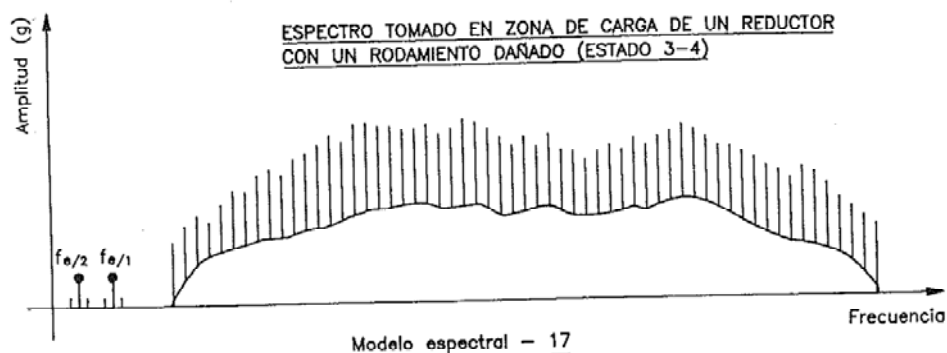
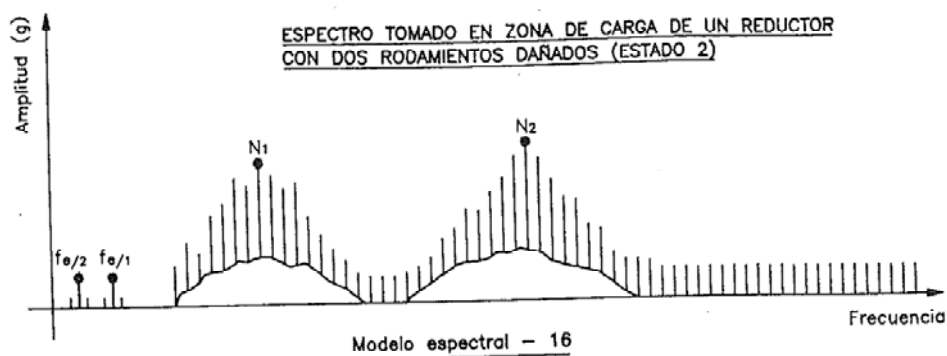


Figura 11.3.- Modelos espectrales de defectos estudiados.

Otra gran aportación es el mapa de defectos en rodamientos (tabla 11.2) con los síntomas que los identifican a través de las vibraciones y con las técnicas de análisis más adecuadas a aplicar en cada caso.

<b>TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO</b>	<b>SÍNTOMAS</b>
<b>Espectro global en aceleración (o velocidad para bajas rpm)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elevación de amplitudes de aceleración en la banda de resonancia del rodamiento.</li> <li>- Potencia elevada en la banda del rodamiento deteriorado.</li> <li>- Aparición d gran cantidad de picos en la banda del rodamientos deteriorado, tantos más cuanto mayor sea el grado de defecto. Si el defecto consiste en una holgura excesiva del rodamiento, el número de picos se multiplicará.</li> <li>- Ruido de fondo elevado, más elevado cuanto mayor sea el grado de desarrollo del defecto.</li> <li>- A mayor grado del defecto, mayor anchura de la banda de rodamientos, que puede llegar a abarcar hasta las altas frecuencias.</li> <li>- Las variaciones de carga y los ruidos afectarán a las amplitudes en la banda de rodamientos, sobre todo si estas se encuentra en las altas o bajas frecuencias.</li> <li>- Diversos defectos de montaje de engranajes, excitan las bandas de los rodamientos que sostienen al eje o ejes defectuosos.</li> </ul>
<b>Spike-Energy</b>	Esta técnica, tal y como está actualmente desarrollada no ofrece garantías en las cajas de engranajes.
<b>Demodulación de las bandas de rodamientos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exige tener localizadas con cierta exactitud las bandas de resonancia de los rodamientos, para lo cual se puede usar la técnica de filtrado vía CEPSTRUM de las frecuencias sincrónicas (TEMPSEL)</li> <li>- Detecta bandas laterales correspondientes a las frecuencias rotacionales de defecto del rodamiento.</li> <li>- La energía de modulación presente en la banda del rodamiento deteriorad es proporcional al grado de deterioro del rodamiento.</li> </ul>
<b>Cepstrum de la banda de rodamientos</b>	Inefectivo cuando el ruido del espectro es muy elevado y cuando la resolución es baja.
<b>Temporal VISDITEMP TEMPSEL</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sin tratamiento de la señal, sólo es efectiva para defectos aislados y de tipo monoimpulsivo.</li> <li>Con tratamiento de la señal, es especialmente útil para rodamientos que giren a bajas velocidades</li> </ul>

Tabla 11.2.- Síntomas de defecto y técnicas apropiadas.

Por último, también cabe reseñar el desarrollo de las técnicas que se ha denominado TEMPSEL, especialmente útil es útil para localizar con gran exactitud las frecuencias de resonancia de rodamientos antes de proceder a la demodulación de sus bandas, y su aplicación para rodamientos que giran a bajas velocidades, difíciles de estudiar.

El tema 7, **la tesis doctoral de Higinio Rubio Alonso**, de 2003, es la segunda tesis con la que nos encontramos en el tiempo, y hay partes que continúan los trabajos realizados en la tesis de Carlos Roda, pero desarrolladas con mayor profundidad.

En primer lugar, en esta tesis unas de las medidas se van a llevar a cabo sobre un prototipo de reductor industrial y con una caja de engranajes, similar a la que nos encontramos en la tesis de Carlos. Aquí se van a unir a más medidas realizadas sobre un banco de ensayos de rodamientos sobre rodamientos FAG3206B. Además, en este caso se ofrece la posibilidad de validar los resultados con modelos de simulación en ALGOR y MATLAB.

Una de las partes más importantes de esta tesis fue la creación de un sistema de denominación de los ensayos y las muestras que se ha mostrado muy efectivo, y ampliamente copiado. Además, tiene la ventaja de que en la propia denominación del rodamiento aparece toda la información necesaria. Esto ya lo pude observar en el proyecto fin de carrera, pero aquí lo ha seguido desarrollando.

Respecto a los ensayos realizados, el análisis más completo lo va a realizar con los rodamientos con defecto en el anillo interior, ensayados en el banco de rodamientos. Se han realizado ensayos con defectos de tamaño variable, con carga axial y radial variable, y con defectos y velocidad variables al mismo tiempo. Gracias a eso, se ha podido caracterizar el comportamiento de los rodamientos con defecto en el anillo interior, donde se puede observar que con el aumento del tamaño de defecto hace que sea más fácilmente detectable, aparte de aumentar la potencia espectral (aunque con otras técnicas no se ven tan claro). Respecto a las variaciones de la carga axial y radial dan resultados irregulares como para ser concluyentes.

Además, en el banco de rodamientos también se ha trabajado con defectos en el anillo exterior, variando las localizaciones del defecto, y con rodamientos con defecto de bola.

Con respecto a la reductora, es muy interesante el estudio previo de la selección del punto de medida, y después los estudios de defectos conocidos (desalineamiento en el

eje de entrada, defecto de un diente de piñón del eje de entrada, defecto en el rodamiento...).

Por último, aunque no tratemos con profundidad el tema de la simulación en ALGOR y MATLAB, es importante el paso que se da en esta tesis, porque en su momento no había ningún modelo teórico que incluya todos los aspectos que condicionan la dinámica de los rodamientos, y con la aplicación de programas que combinan modelado de elementos finitos y modelado de condiciones dinámicas se abría un nuevo camino en esta vía.

En este trabajo no ha sido posible abarcar todos los ensayos realizados en la tesis, así que hemos intentado simplemente caracterizar cada una de las técnicas usadas para el análisis de los rodamientos, y hemos tratado de ilustrarlo con algún ejemplo de los ensayos realizados.

A nivel de conclusiones, de todas las técnicas usadas, las que se han probado que son más efectivas son: en el dominio de la amplitud, el análisis de la evolución de la potencia espectral global y a frecuencias selectivas (cuantificar el tamaño del defecto); entre las técnicas gráficas, el análisis del espectro de la envolvente (identificar defectos). Por tanto, uniendo ambas técnicas, podemos tener una idea clara del defecto que tiene el rodamiento y su magnitud.

En el capítulo 8 nos ocupa **la tesis doctoral de José María Marín López**, de 2009, que aunque es posterior a la de Omar José Castro, pero se ha cambiado el orden de ambas por razones de coherencia dentro del proyecto, que más adelante explicaremos.

En esta tesis, las medidas se van a efectuar sobre rodamientos SKF 6206 de 9 bolas, ensayados con 9 y con 3 bolas. Los resultados en este caso se van a validar con señales simuladas con modelos gracias a las ecuaciones de Lagrange y Newton.

Aunque en este proyecto sólo nos hemos fijado en la parte de las medidas de vibración, además se han realizado en estudio muy completo del amortiguamiento, y sobre todo del comportamiento térmico.

Una de las partes más importantes en este proyecto fue la creación del banco, que se hizo expresamente para el desarrollo de esta tesis, y es muy interesante el sistema de mordaza que permitió realizar las medidas de todas las variables (vibración, temperatura...).

El desarrollo de los ensayos completos fue:

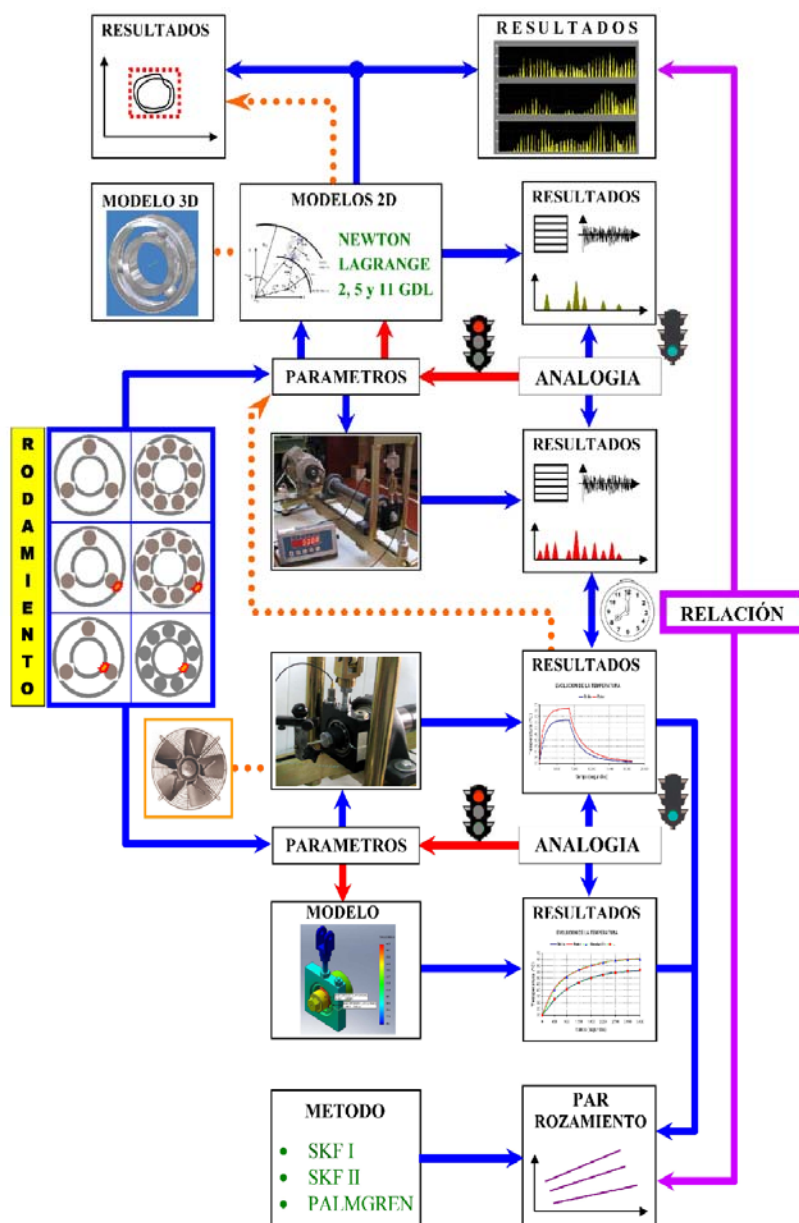


Figura 11.4.- Diagrama de bloques del desarrollo de la tesis.

Respecto a las medidas de vibración, las técnicas que se usan en esta tesis son las que se denominan de acondicionamiento de la señal (temporal, espectro y análisis Wavelet).

Por tanto, de cada ensayo se obtendrá la señal temporal de vibración medida con el acelerómetro, y de ahí se obtendrá la envolvente de la señal temporal rectificada.

El siguiente paso se desarrollará en el campo de la frecuencia, y llevará a la representación del espectro de la señal temporal y de la envolvente, de donde se podrán empezar a sacar conclusiones de las frecuencias de defecto que encontramos en la señal medida, y por tanto caracterizar el defecto que encontramos en el rodamiento.

Por último, se obtienen los mapas wavelet de la señal temporal y el espectro, utilizando como wavelet madre, la Daubechies 6, por ser la que mejores resultados obtiene.

En esta tesis, la manera de validar los resultados es comparándolos con las señales simuladas calculadas a partir de las ecuaciones de Lagrange y Newton, observando una gran similitud en los resultados, aceptando el contraste realizado.

El capítulo 9 está dedicado a la **tesis doctoral de Omar José Lara Castro**, de 2007. La gran novedad de esta tesis es el uso de las redes neuronales para la caracterización de los defectos en rodamientos.

En este caso, las medidas se van a efectuar sobre rodamientos FAG 3206B, sobre los que se van a reproducir los defectos (normal, defecto anillo interior, anillo exterior, defecto de bola), y medir en el banco de ensayos. En este caso, el resultado que se persigue es la caracterización del defecto producido en el rodamiento.

Es interesante reseñar que con los mismos rodamientos, se van a hacer 3 grupos distintos, con distintos números de muestras: el grupo de datos G1 consta de 15 rodamientos de cada condición o clase; el grupo de datos G2 posee 35 rodamientos; y el grupo G3, 49 rodamientos en total.

	Grupo G1	Grupo G2	Grupo G3
Nº de señales	1200	2800	3920
Nº de rodamientos	60	140	196

**Tabla 11.3.- Número de rodamientos y señales en cada uno de los grupos formados.**

Las gráficas y cálculos se van a hacer para los tres grupos por separado. El tercer grupo (196 rodamientos), engloban la totalidad de rodamientos ensayados.

La metodología que se va a usar en esta tesis la tenemos reflejada en el gráfico siguiente:



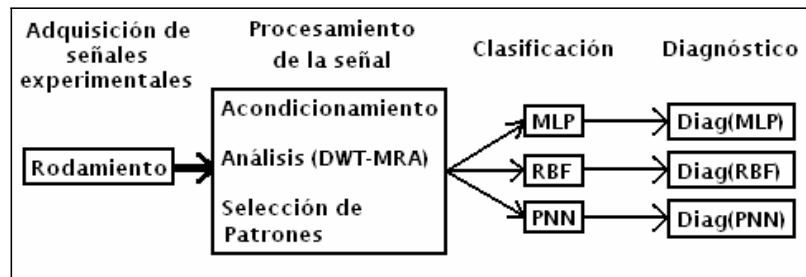


Figura 11.5.- Esquema general de metodologías de diagnóstico de defectos basadas en redes neuronales individuales.

Una vez que se obtengas las señales temporales, se van a acondicionar por medio de la DWT-MRA, usando la wavelet madre Daubechies 6. A partir de ahí se va a hacer la selección de patrones partiendo de las frecuencias de defecto conocidas de los rodamientos, de donde se van a obtener los coeficientes de detalle necesarios para las redes neuronales que se van a usar.

En esta tesis se van a usar 3 tipos de redes neuronales, para los que se ha tenido que diseñar desde la red, hasta el entrenamiento, con el objetivo de obtener el mejor resultado.

Las redes usadas son: red perceptron multicapa (MLP), red de base radial (RBF) y red probabilística (PNN), y los resultados de las metodologías propuestas son los siguientes:

Grupo	Neuronas en capa Oculta	600 RPM	Neuronas en capa Oculta	1200 RPM	Neuronas en capa Oculta	1800 RPM
G1	30	76.67	30	61.68	30	73.33
G2	30	84.29	30	72.86	30	73.57
G3	30	85.71	30	81.63	30	77.04

Tabla 11.4.- Resultados Generales de la Clasificación con redes MLP.

Grupo	Neuronas en capa Oculta	600 RPM	Neuronas en capa Oculta	1200 RPM	Neuronas en capa Oculta	1800 RPM
G1	100	90	70	75	100	90
G2	90	80	70	77.14	100	82.14
G3	100	84.18	100	75.71	100	74.49

Tabla 11.5.- Resultados Generales de la Clasificación con redes RBF.

Grupo	Neuronas en capa Oculta	600 RPM	Neuronas en capa Oculta	1200 RPM	Neuronas en capa Oculta	1800 RPM
G1	1200	83.33	1200	77.77	1200	73.33
G2	2800	85.71	2800	85	2800	84.29
G3	3920	88.78	3920	84.49	3920	81.12

Tabla 11.6.- Resultados Generales de la Clasificación con redes PNN.

Como vemos, aunque los resultados no son malos (casi todos por encima del 70%, con picos de hasta el 90%), usando los resultados obtenidos con las redes neuronales se va a crear un sistema clasificador híbrido como alternativa. Este sistema integra los resultados obtenidos en todas las redes, de acuerdo con la metodología de la figura:

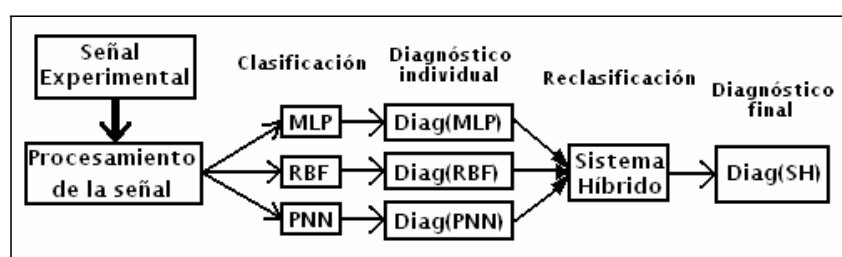


Figura 11.6.- Esquema general de la metodología de diagnosis de defectos basada en sistemas híbridos de clasificación.

Los resultados obtenidos con el sistema híbrido son los siguientes:

Grupo	Neuronas en capa Oculta	600 RPM	Neuronas en capa Oculta	1200 RPM	Neuronas en capa Oculta	1800 RPM
G1	-	86.7	-	78.3	-	85
G2	-	87.9	-	87.1	-	88.6
G3	-	91.3	-	90.8	-	84.2

Tabla 11.7.- Resultados Generales de la Clasificación con Sistemas Híbridos.

Como conclusión general, aunque en sistemas con poca cantidad de datos las redes RBF se muestran muy eficaces, siendo además más sencillas, en general los resultados obtenidos por el sistema híbrido mejoran los obtenidos por las redes simples individualmente. Los sistemas clasificadores híbridos alcanzan mayor eficiencia en cuanto más patrones de entrenamiento manejan las redes neuronales que lo componen.

En el capítulo 10 tenemos la última tesis que nos ocupa en este proyecto, que es la **tesis doctoral de María Jesús Gómez García**, de 2014. En este proyecto, el espacio dedicado a esta tesis es menor que al resto, pero no por ello es menos importante. Además, los resultados que se obtienen son excelentes.

En esta tesis se realiza un exhaustivo y estupendo trabajo para la aplicación de las redes neuronales a la diagnosis en ejes. Para ello, se usan las energías de la transformada de Paquetes Wavelet para la extracción de patrones para usarse posteriormente en las redes neuronales. Este procedimiento ha sido bastante innovador en ejes, y además, ha conseguido unos niveles de clasificación excelentes.

La parte que nos ocupa a nosotros, los rodamientos, proviene de la generalización de la técnica usada en ejes para el resto de elementos rotativos. Para ello, se desarrolla la misma metodología usando los datos obtenidos en la tesis perteneciente a Omar José Lara Castro.

En este caso, se utilizan las energías obtenidas mediante paquetes wavelet con niveles de descomposición de 2 a 9 como patrones de entrada para los entrenamientos de las redes RBF (función de base radial).

Se van a usar 24 redes neuronales optimizadas, 8 para cada velocidad (10, 20 y 30 Hz).

Con el desarrollo de esta técnica, los resultados que se obtienen son:

Velocidad (Hz)	Neuronas en la capa oculta	Tasa de acierto ( %)
10	60	97,13
20	87	97,26
30	145	95,74

**Tabla 11.8.- Resultados obtenidos para un *goal* de 0,1.**

Como vemos, la tasa de acierto es muy buena, mejora los obtenidos en la tesis de Omar, y se demuestra que es un método más que válido, no ya para reconocer un rodamiento dañado, sino para la identificación del tipo de defecto del rodamiento.

De esta manera, queda demostrado que es un método aplicable tanto a ejes como a rodamientos.

## **2. CONCLUSIONES GENERALES**

En este proyecto nos hemos encontrado con 5 tesis que nos han mostrado 5 maneras de encarar la caracterización de los defectos en los rodamientos.

Estas tesis las podemos dividir en dos familias principales:

Por un lado, tenemos las tres primeras tesis (Carlos, Higinio y José María). En este caso, se han utilizado sólo métodos de análisis de la señal (dominio temporal, frecuencia, y análisis wavelet).

Estas técnicas en el dominio temporal y de la frecuencia son especialmente efectivas cuando se da un defecto sólo, o si el defecto del rodamiento se encuentra en un estado avanzado. Esto se ve especialmente en el caso de la primera tesis, perteneciente a Carlos. Esta tesis, como ya hemos comentado, se ha desarrollado con un enfoque industrial, donde lo importante, más que caracterizar el tipo de defecto que tiene el rodamiento, es simplemente detectar que hay un defecto en el rodamiento. Los resultados de esta tesis se han validado con las mediciones reales del reductor de la mina.

Las otras dos tesis, pertenecientes a Higinio y José María, tras realizar el análisis espectral, les es posible identificar las frecuencias de defecto, y por tanto poder concluir con el tipo de defecto que tiene el rodamiento. En este caso, la comprobación de las mediciones se ha podido realizar gracias a las simulaciones que se han desarrollado, validándose los resultados obtenidos.

La gran ventaja de estas técnicas es el bajo coste computacional en comparación con otras técnicas más complicadas, pero vemos que para algunas aplicaciones, se pueden extraer conclusiones muy válidas.

Respecto a la otra familia, la tesis de Omar y María Jesus, recurren a métodos de diagnosis más complicados, en este caso, las redes neuronales, para caracterizar los defectos.

Con este tipo de análisis se consigue caracterizar completamente todos los tipos de defectos, y en diferentes condiciones, con unos resultados más que aceptables.

El gran problema que tienen estos métodos es que se generan millones de datos, y el coste computacional de analizarlos es muy elevado. Además, al llevar emparejado un análisis previo de las señales, conllevan un coste en tiempo también superior.

Por tanto, como vemos, tenemos dos filosofías distintas para afrontar el mismo problema, y dependerá de la aplicación que tengamos, será conveniente seguir un camino o el otro. Además, habrá que evaluar el coste, tanto computacional como de tiempo, para determinar el tipo de análisis a realizar.

Además, como hemos visto, los caminos no son excluyentes, y los distintos análisis se complementan entre sí, por lo que es posible combinarlos para conseguir una información más completa.

En todos los casos, se escoja un camino o el otro, queda demostrado en estas tesis que se pueden obtener resultados excelentes.

### **3. TRABAJOS FUTUROS**

Respecto a los trabajos futuros, se han planteado trabajos muy interesantes en las tesis, y que con el paso del tiempo se han ido desarrollando en distintos estudios, trabajos, proyectos o tesis.

De todas maneras, desde mi humilde posición, considero que determinados campos, como el tema de engranajes o sistemas complejos, quizá no han tenido tanta atención como por ejemplo los cojinetes o rodamientos.

Además, siempre es interesante explorar los límites que tiene cada una de las técnicas, llevadas a las condiciones más extremas de ensayo, ya sea de velocidades, cargas, o desarrollo de los defectos.

Por otro lado, dado que el desarrollo de las herramientas informáticas actuales nos permiten unas velocidades de procesamiento bastante aceptable, sería bueno investigar el uso de otras redes neuronales, y el desarrollo de sistemas híbridos que puedan mejorar los resultados de los actuales.



Por último, respecto a las últimas técnicas desarrolladas para la caracterización de defectos, como la de vectores característicos, y tomando como referencia el trabajo realizado en el proyecto “Identificación del estado de rodamientos de bola mediante análisis Wavelet y máquinas de soporte vectorial”, otros de los futuros desarrollos que se pueden llevar a cabo es el aumento del número de vectores característicos para una mejor caracterización. El proyecto citado pertenece a Álvaro Arroyo San Cristóbal, y ha sido publicado en junio 2015.



# BIBLIOGRAFÍA





## LIBROS

- [L1] GARCÍA PRADA, J. C.; PEDRERO MOYA, J. I. *Cálculo, construcción y ensayo de máquinas. Addenda de vibraciones en máquinas*. U.N.E.D. 1993.
- [L2] BRAUN, S. *Discover Signal Processing: An Interactive Guide for Engineers*. Ed. John Wiley & Sons, 2008.
- [L3] LAFITA BABIO, F.; MATA-CORTES, A. *Vibraciones mecánicas en ingeniería*. INTA, 1964.
- [L4] BRAUN, S.; EWINS, D.; RAO, S. *Encyclopedia of Vibration*. Ed. Elsevier, 2001.
- [L5] CRESPO A, MOREU P, SÁNCHEZ A. *Ingeniería de Mantenimiento. Técnicas y métodos de aplicación a la fase operativa de los equipos*. Ed. AENOR, 2004.
- [L6] KELLY, A.; HARRIS, M. J. *Gestión del Mantenimiento Industrial*. Fundación REPSOL, 1997.
- [L7] MONCHY, F. *Teoría y práctica del mantenimiento industrial*. Ed. Masson, 1990.
- [L8] GABRIEL, M.; PIMOR, Y. *Mantenimiento industrial por ordenador*. Ed. Masson, 1989.
- [L9] GONZÁLEZ FERNÁNDEZ, F. J. *Teoría y práctica del Mantenimiento Industrial Avanzado*. Fundación CONFEMETAL, 2009.
- [L10] REY SACRISTAN, F. *Por qué implantar el TPM. Manual técnico de mantenimiento y Gestión total del sistema de producción*. Ed. Alción, 2000.
- [L11] REY SACRISTAN, F. *Mantenimiento Total de la Producción (TPM): Proceso de implantación y desarrollo*. Fundación CONFEMETAL, 2001.
- [L12] WIREMAN, T. *Preventive Maintenance*. Ed. Prentice Hall, 1984.
- [L13] EISENMANN, R. C.; EISENMANN, R. C. Jr.; *Machinery Malfunction Diagnosis and Correction*. Ed. Prentice Hall, 2000.

## REVISTAS Y ARTÍCULOS

- [R1] “El mantenimiento en España” Ed. Asoc. Española de Mantenimiento. 2010.
- [R2] DYNA, Ingeniería e Industria. Junio 2010.
- [R3] Técnica Industria. Septiembre 2013.
- [R4] “La estrategia predictiva en el mantenimiento industrial”, Francisco Ballesteros, PREDITEC, Agosto 2011.
- [R5] “El análisis de vibraciones y otras aplicaciones disponibles para reducir los costes operativos de las máquinas”, PRÜFTECHNIK.
- [R6] “Análisis de vibraciones aplicado a las máquinas rotatorias de baja velocidad”, Édgar G. Estupiñán y Pedro N. Saavedra.
- [R7] “Técnicas de diagnóstico para el análisis de vibraciones de rodamientos”, Édgar G. Estupiñán y Pedro N. Saavedra. Universidad de Concepción.
- [R8] “Application of cluster analysis to machine fault diagnosis using vibration signal processing”, Mariano Artés.
- [R9] “A summary of fault modelling and predictive health monitoring of rolling element bearings”, Idriss El-Thalji y Erkki Jantunen.
- [R10] “A Classification of typical defects in roller bearing machines”, M. Artés, J.C. García Prada, E. Gómez. Canadian Conference and Exhibition about Industrial Automation. Junio 1992.

## PÁGINAS WEB

- [W1] [www.elreporteroindustrial.com](http://www.elreporteroindustrial.com)
- [W2] [www.AENOR.es](http://www.AENOR.es)
- [W3] [solomantenimiento.blogspot.com](http://solomantenimiento.blogspot.com)

## CURSOS

- [C1] “Políticas de Mantenimiento de Equipos Industriales”, Fundación Universidad Carlos III, octubre de 1995
- [C2] “Curso sobre Mantenimiento Predictivo y sus distintas Técnicas de Aplicación”, Predictove Ingenieros, noviembre 2009
- [C3] “Curso de Análisis de las Vibraciones para el diagnóstico de fallos y Mantenimiento Preventivo”, Bruel&Kjaer Ibérica, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Telecomunicación.

## PROYECTOS FIN DE CARRERA

- [P1] RUBIO ALONSO, H. *Análisis de la señal de vibración ante diferentes niveles de defecto en sistemas mecánicos*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Nacional de Educación a Distancia, septiembre de 1.998.
- [P2] ALAMEDA CASABELLA, A. *Guía para el procesamiento y análisis de señales. Aplicación a la diagnosis de rodamientos*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III de Madrid, noviembre de 2.010.
- [P3] ROS RODRÍGUEZ, F. *Estudio del efecto de la carga en rodamientos defectuosos*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III de Madrid, octubre de 2.010.
- [P4] ALBERTOS CABAÑAS, M. *Monitorización y clasificación de defectos en rodamientos de bolas. Estudio transitorio*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III de Madrid, marzo de 2.011.
- [P5] SOMONTE MARTÍN, R. *Análisis de filtros para la detección de fallos en rodamientos industriales a partir de su señal de vibración*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III de Madrid.

[P6] ARROYO SAN CRISTÓBAL, A. *Identificación del estado de rodamientos de bola mediante Análisis Wavelet y Máquinas de soporte vectorial*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III de Madrid, junio 2015.

## TESIS

[T1] GARCÍA PRADA, J. C. *Análisis de armónicos según órdenes de rotación en sistemas mecánicos*. Tesis doctoral, E.T.S.I.I. U.N.E.D. 1995

[T2] RODA VÁZQUEZ, C. J. *Catálogo de identificación de averías a través del análisis espectral*. Tesis doctoral, E.T.S.I.I. U.N.E.D. 1995

[T3] RUBIO ALONSO, H. *Caracterización de defectos localizados en sistemas mecánicos rotativos mediante análisis de vibraciones*. Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, 2.003.

[T4] LARA CASTRO, O. J. *Nuevas metodologías no invasivas en diagnosis de defectos incipientes en rodamientos de bola*. Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, mayo de 2.007.

[T5] MARIN LOPEZ, J. M. *Análisis y caracterización holista de un sistema rotativo complejo*. Tesis doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, Julio 2009.

[T6] GÓMEZ GARCÍA, M. J. *Metodología de selección de indicadores óptimos para el análisis y diagnosis del estado de la máquina: aplicación a elementos mecánicos rotativos*. Tesis doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, Abril 2014.



## **Anexo**

La primera tesis doctoral sobre el tema que nos ocupa pertenece a Juan Carlos García Prada. El título de la misma es: “Análisis de armónicos según órdenes de rotación en sistemas mecánicos”, y está fechada 1.991.

La tesis tenía como objetivo fundamental establecer un método para la detección de fallos incipientes por rotura en los rodamientos de una máquina rotativa de dos apoyos. Para ello, se utilizan diversas técnicas tanto estadísticas multivariantes (Análisis de Correlación, Cluster Analysis, Análisis Discriminante) como técnicas de análisis de la modulación en amplitud de las frecuencias de defecto y análisis de grupos de líneas espectrales.

### **1. TÉCNICAS USADAS**

La principal técnica utilizada para obtener el análisis espectral de las señales captadas es el análisis por órdenes de rotación, que utiliza como información proveniente de la rotación de la máquina, la aceleración en un cierto punto típico.

Para usar la técnica, antes de nada es necesario descomponer la señal compleja en señales más simples, para los que se va a aplicar el algoritmo de la FFT, aunque intentando minimizar los errores que ello conlleva.

#### **Análisis de armónicos según órdenes de rotación.**

Esta técnica está enfocada al estudio del comportamiento de los órdenes armónicos (múltiplos armónicos) de una señal de vibración procedente de sistemas mecánicos rotativos, obteniéndose información tanto de la frecuencia fundamental del sistema mecánico como de sus armónicos de orden superior. La característica fundamental de este tipo de análisis es que estabiliza el patrón armónico en ciertas líneas independientemente de las variaciones de la frecuencia fundamental de giro del sistema. Se fundamenta en que para calcular los espectros digitales de frecuencia de una cierta señal mecánica cíclica necesitamos muestrear dicha señal temporal, por la que si hacemos que dicha frecuencia de muestreo esté relacionada con la frecuencia principal de

giro del sistema mecánico se puede conseguir que los espectros de frecuencia se generen en función de determinadas frecuencias normalizadas.

Una de las características del análisis según órdenes de rotación es la eliminación del emborronamiento ("smearing") producido en la medida de espectros ante ligeras variaciones de la velocidad fundamental del sistema.

### **Análisis de firma. ("signature analysis").**

El desarrollo de un defecto excita ciertas frecuencias de vibración, por tanto, hay ciertos comportamientos en la señal de vibración que se producen siempre ante parecidas situaciones. El estudio de la similitud o disparidad de esos patrones de vibración con los obtenidos para un sistema se denomina "Signature Analysis" (análisis de firma).

El análisis de firma se basa en la existencia de una base de datos donde se almacenan los diferentes patrones de vibración de las situaciones interesantes a detectar y se comparan con las medidas de vibración (nuevos patrones) adquiridas del sistema mecánico en estudio.

## **2. SISTEMAS DE MEDIDA**

Se han realizado numerosos ensayos sobre una bancada prototipo diseñada en el Departamento de Mecánica en donde se han captado y medido las vibraciones de los rodamientos, según tipo de defecto, en diversas circunstancias de carga axial, radial y con distintas velocidades de giro.

La bancada está constituida por una mesa soporte sobre la que se encuentra el sistema integrado por un eje apoyado en dos portarrodamientos.

Se ha desarrollado un analizador digital de espectros F.F.T. enlazado a un equipo de proceso de datos, y un sistema de adquisición de datos de vibración que utiliza para su análisis la técnica de análisis de órdenes de rotación.

Se va a trabajar sobre cuarenta rodamientos del tipo FAG 7206B clasificados en cuatro grupos de diez y representando cada grupo, respectivamente, al grupo de rodamientos nuevos, el grupo de rodamientos con bola defectuosa, el grupo de rodamientos con anillo externo dañado y por último el grupo con anillo interno dañado.



Se introdujeron los defectos siguientes, producidos por un punzón eléctrico:

- Defecto en anillo externo: desgaste en camino de rodadura de bola en anillo externo.
- Defecto en anillo interno: desgaste en camino de rodadura de bola en anillo interno.
- Defecto en una bola: conjunto de estrías en la superficie de la bola.

Las condiciones de ensayo fueron las siguientes:

- Velocidad de giro = 900 rpm
- Carga axial = 630 N
- Carga radial = 630 N

Aunque se considerará en los ensayos la existencia de un único defecto típico, deberemos tener en cuenta la influencia de una multitud de defectos típicos sobre el espectro de vibración. Dicha influencia es de difícil predicción, en general por lo que, se considerará que la variación más importante es una variación en las amplitudes de los picos de vibración y una elevación de la línea espectral base ("base line"), lo cual producirá un engrosamiento de los picos de señal de vibración.

La existencia de desequilibrio en el eje de la bancada, produce una vibración de frecuencia igual a la de giro del eje. La existencia de desalineamiento produce una perturbación de frecuencia doble a la del giro del eje desalineado de la bancada. La aparición de defectos simples del tipo: bola, anillo externo, anillo interno, portabolas, defecto de engrase, etc., producen vibraciones impulsivas cada vez que alguna de las bolas pasa sobre los defectos o que la misma bola se apoya en el propio defecto de la bola.

### **3. TRATAMIENTO DE DATOS**

Los ficheros con los datos espectrales sufrirán dos tratamientos. El primero consistirá en el análisis estadístico multivariable de los espectros de baja frecuencia medidos sobre el portarrodamiento más cercano al rodamiento en ensayo. El segundo consistirá en el análisis y procesado de los espectros de potencia medidos con el acelerómetro posicionado en la garra que porta el rodamiento en ensayo.

### **Acotación de errores.**

Para acotar el error de los resultados es preciso realizar una serie de suposiciones y ante ellas calcular que tamaño deben tener las muestras para asegurar un cierto error. En nuestro caso particular hay que calcular dos tamaños de muestra; una, la necesaria para obtener amplitudes espectrales de un cierto rodamiento con un cierto error aleatorio; dos, el tamaño necesario, que debe tener la muestra de rodamientos a medir (número de cada clase a ensayar), para que los espectros calculados sean representativos del tipo de rodamiento en estudio.

Para visualizar la existencia de líneas espectrales diferenciales obtenidas de los ensayos respecto a un espectro de referencia, usaremos una **tabla de eventos** que explicaremos en el tema 4. Este tipo de gráficos van a ser muy usados en posteriores estudios.

### **Análisis multivariante.**

La parte de la metodología estadística usada para analizar medidas simultáneas de muchas variables se denomina análisis multivariable. La mayoría de los métodos usados se basan en la hipótesis de normalidad de las distribuciones manejadas. La utilización de técnicas multivariantes lleva asociada implícitamente el uso del ordenador, pues los cálculos necesarios son de gran complejidad.

Se va a trabajar sobre el conjunto de datos generados por cuarenta rodamientos del tipo FAG 7206B clasificados en cuatro grupos (rodamientos nuevos, rodamientos con bola defectuosa, rodamientos con anillo externo dañado, rodamientos con anillo interno dañado) de diez rodamientos cada uno. El estudio cualitativo previo y las características del paquete estadístico llevó a limitar a diez el número de variables a estudiar a la vez (zona de diez frecuencias), formando cuarenta grupos con diez variables consecutivas cada uno.

Una vez que se tenían las variables a estudiar se realizaron los siguientes análisis estadísticos en cada uno de los grupos:

#### **1. Análisis de grupos ("cluster analysis").**

El "cluster analysis" permite visualizar gráficamente la agrupación de las observaciones generados en los distintos ensayos en un espacio n-dimensional buscando la homogeneidad dentro del grupo y la heterogeneidad entre grupos diferentes. Estas gráficas permiten localizar fenómenos y sus comportamientos. La vía gráfica no sustituye

a la vía matemática, pero muchas veces simplifica las decisiones sobre nuevos tratamientos.

(X 1E-4)

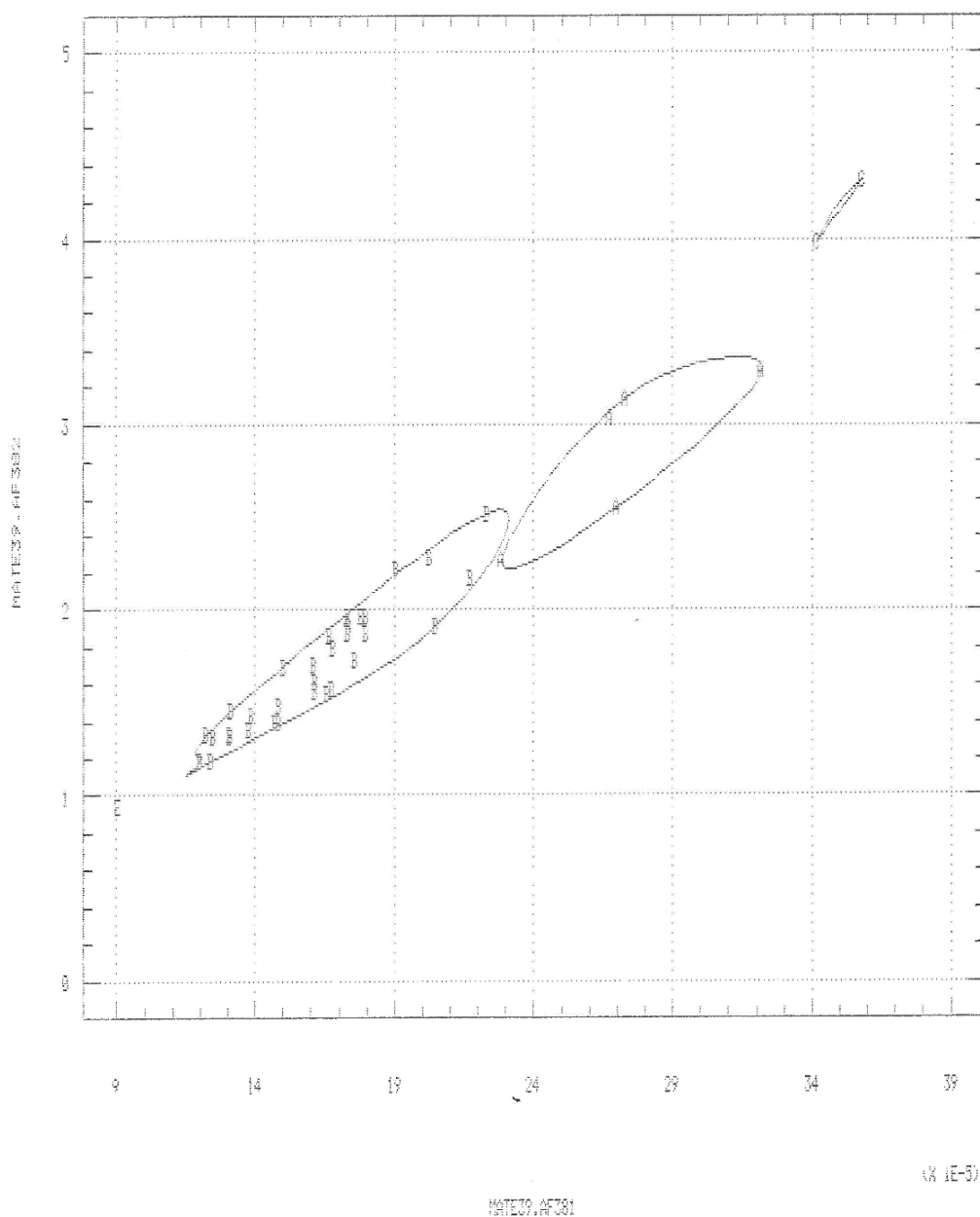


Figura A1.- Ejemplo de cluster analysis.

Otra característica muy importante de las herramientas gráficas es la flexibilidad para representar todos los datos. Muchas de las gráficas usadas en el análisis multivariable no son multidimensionales sino unidimensionales mostrando características de una variable en el entorno de datos multidimensionales. La más común de las geometrías utilizadas es la euclídea, un punto se representa por  $n$  coordenadas correspondientes a los valores de

las variables en observación, o también cada variable es condensada por las coordenadas correspondientes al número de observaciones de esa variable.

El "cluster analysis" utilizado como técnica de agrupamiento de las observaciones realizadas permite un estudio previo de la estructura natural de los datos. En nuestro caso se visualizarán cuarenta observaciones correspondientes a cuarenta rodamientos ensayados, cada observación vendrá caracterizada por diez variables (amplitudes espectrales de diez frecuencias consecutivas) para cada uno de los cuarenta grupos formados. Los "clusters" formados se visualizarán en todos los casos sobre el plano formado por las dos primeras variables del grupo. La visualización de las gráficas que genera el "cluster analysis" permite apreciar en una primera aproximación si las observaciones del mismo tipo se agrupan en ciertas zonas.

## **2. Análisis de la matriz de correlación.**

De la matriz de correlación se obtienen las posibles relaciones de linealidad entre las variables del grupo, permitiendo reducir el número de variables de grupo y simplificar posteriormente el análisis discriminante.

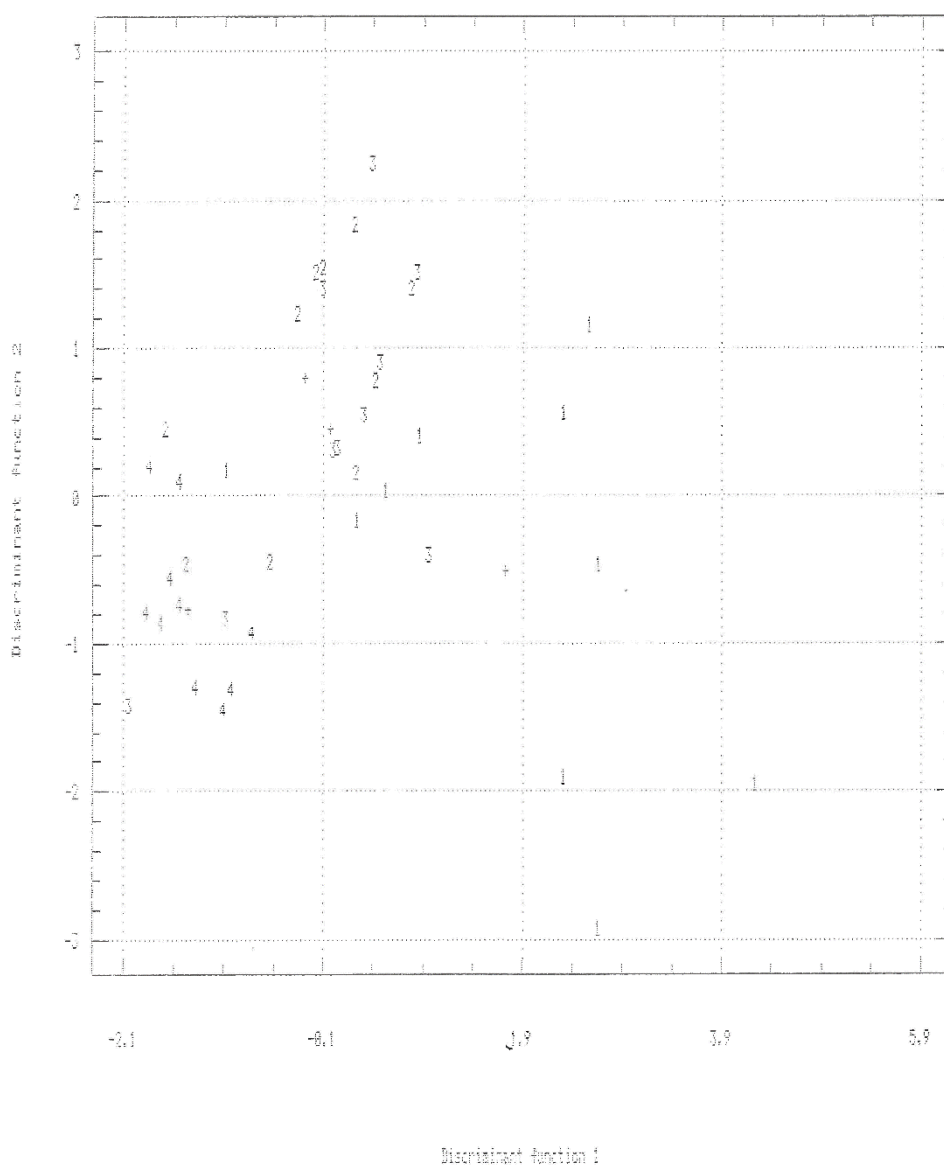
Este análisis es básico pues todos los paquetes estadísticos tienen acotada su resolución para el cálculo de los determinantes de las matrices de correlación, algoritmo básico para la realización de las inversiones de dicha matriz. En principio se intenta generar el análisis discriminante para el grupo de diez variables; si se produce un error de "fuera de rango" en el cálculo de la matriz inversa de correlación (cálculo interno del paquete estadístico), se elimina el grupo de variables; esto permite eliminar las variables muy correlacionadas y simplifica el análisis.

## **3. Análisis discriminante.**

El análisis discriminante permite clasificar las observaciones realizadas según una variable auxiliar de clasificación (en este caso la pertenencia o no a un tipo de defecto). Informa tanto gráfica como estadísticamente de la bondad de la clasificación y genera varias funciones, denominadas discriminantes, combinaciones lineales de las variables en análisis. Estas funciones permiten clasificar las nuevas observaciones espectrales de los rodamientos tomando como referencia las cuarenta observaciones medidas con las cuatro decenas de rodamientos tipo.

El análisis discriminante tiene como principal objetivo la predicción de la pertenencia a un cierto grupo de los datos de una nueva observación, es decir buscar la combinación lineal de las variables que maximizan las diferencias entre grupos. Las diferentes

funciones discriminantes calculadas se presentan de la siguiente manera. La primera función discriminante maximiza las diferencias entre grupos, la segunda función discriminante es la que separa mejor a los grupos pero sin considerar la información contabilizada por la primera función discriminante, esta segunda es ortogonal a la primera. Se podrían ir generando nuevas funciones discriminantes hasta  $k-1$  siendo  $k$  el número de variables, pero estas últimas no aportan mayor poder diferenciador.



**Figura A2.- Ejemplo de análisis discriminante.**

## 4. RESULTADOS

### Resultados cualitativos, ensayos a baja frecuencia.

Del análisis del espectro de aceleraciones del sistema mecánico "bancada de simulación de fallos de rodamientos" se puede concluir que de la serie de líneas espectrales comunes a todos los ensayos es posible distinguir las producidas por la resonancia de la estructura de la bancada y las generadas por otros elementos rotativos (otros rodamientos, ...) distintos al rodamiento objeto de estudio.

Para visualizar la existencia de líneas espectrales diferenciales respecto a un espectro de referencia usaremos una tabla de eventos. Para la realización de las tablas de eventos espectrales se hará de la siguiente manera: se dispondrán en abscisas los rodamientos numerados del 1 al 10, a su vez en ordenadas dispondremos los números de cuadro del 1 al 10, correspondiendo estos a cada una de los diez intervalos de frecuencia en que dividiremos la escala de frecuencias.

Barreremos por rodamientos y para cada uno de ellos por cuadro obteniéndose un evento << 1 >> cuando el espectro a comparar tenga una nueva línea espectral respecto al referencia y obteniéndose un evento << 0 >> cuando lo anterior no se cumpla.

Los espectros referencia para los distintos ensayos serán en unos casos el correspondiente a la bancada sin rodamientos y en otros a la bancada con un rodamiento nuevo.

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	1	2	0	1	1	1	0	1	1	1
8	0	0	1	2	0	1	0	1	0	0
9	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla A1.- Espectro rodamiento nuevo frente a espectro garra vacía

Del estudio de los diez cuadrantes en que está dividida la escala de frecuencias de 200 Hz, se puede deducir que:

-En el primer y segundo cuadrante se tienen las líneas correspondientes a la frecuencia de giro de la bancada y a su segundo armónico, originadas por el efecto de desalineamiento producido al cargar el eje de la bancada con los rodamientos nuevos.

-En el cuadrante tercero en los espectros correspondientes a los rodamientos A1, A3, A7, A9 aparece amplificado el cuarto armónico.

-En los cuadrantes cuarto, quinto, sexto y décimo no aparecen nuevas líneas espectrales.

-En el cuadrante séptimo y octavo se tienen dos nuevas líneas que corresponden al noveno y décimo armónico de la frecuencia de giro de la bancada. En el séptimo cuadrante se detecta una nueva línea entre el octavo y noveno armónico del espectro correspondiente al rodamiento A2. En el octavo cuadrante aparece una nueva línea entre el noveno y el décimo armónico del espectro correspondiente al rodamiento A4.

-En cuanto al noveno cuadrante se detecta tanto el armónico número once como una línea entre el undécimo y duodécimo armónico.

Este mismo estudio se puede generar para el resto de tablas de eventos:

- Para rodamientos con defecto en el aro exterior:

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
4	0	0	0	0	0	0	1	0	3	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1
7	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
8	0	1	0	0	2	0	1	0	1	1
9	0	1	1	0	1	1	2	1	2	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

Tabla A2.- Espectro rodamiento con defecto en aro exterior frente a espectro garra vacía.



- Para rodamientos con defecto en aro interior:

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1
4	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	1	2	0	1	2	2	2	2	1	1
8	2	2	0	1	0	2	2	0	0	1
9	2	2	2	2	2	1	2	1	0	1
10	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla A3.- Espectro rodamiento con defecto en aro interior frente a espectro garra vacía.

Para rodamientos con defecto en bola:

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1
4	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
8	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1
9	1	1	0	1	0	2	1	1	2	2
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabla A4.- Espectro rodamiento con defecto en bola frente a espectro garra vacía.

Este tipo de tablas de eventos van a ser muy usadas en estudios posteriores.

### **Resultados cuantitativos, ensayos a baja frecuencia. Análisis estadístico multivariable.**

Los resultados de la aplicación del "cluster analysis" realizado, utilizando la distancia euclídea como medida, con 8 grupos, e imponiendo un número de "clusters" de cuatro:

	01	02	03	04	05	06	07	08
1	1	1	1	0	0	1	0	0
2	0	0	0	1	1	0	1	1
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0

**Tabla A5.- Análisis cluster del ensayo 9.**

En los grupos del uno al ocho correspondientes a los dos primeros cuadros del espectro observamos que aunque hay varios grupos con dos clusters; estos siempre contienen observaciones de los rodamientos nuevos. La explicación es que los rodamientos nuevos al estar sin suavizar pueden producir amplitudes muy diferenciadas en sus líneas espectrales básicas.

### **Resultados cualitativos, alta frecuencia. Análisis de las modulaciones de amplitud.**

De este tipo de estudio observamos, como ya se indicó anteriormente, que el estudio temporal de las vibraciones entraña grandes dificultades que se incrementan extraordinariamente cuando coexisten más de un defecto.

## **6. CONCLUSIONES**

En primer lugar, el uso de los acelerómetros piezoeléctricos junto con un equipo de preamplificación a baterías nos ha permitido eliminar la influencia electromagnética en la señal de medida y obtener un nivel de señal suficiente para ser usada por los siguientes eslabones del equipo de medida y poder así obtener el espectro de vibración de la aceleración en un punto y en una dirección

En segundo lugar, un cuanto la localización de los sensores para obtener la señal de vibración, ha sido preciso variar substancialmente nuestras zonas de medida

El primer análisis, baja frecuencia, ha permitido observar la existencia de una serie de regularidades en los diferentes espectros de rodamiento perteneciente a un mismo tipo.



En cuanto al estudio en el dominio de la frecuencia (baja frecuencia), se ha realizado un análisis estadístico bastante profundo, del cual hemos obtenido una serie de resultados por zonas del espectro que nos permite clasificar el tipo de defecto que actúa principalmente en un rodamiento.

En cuanto al análisis a alta frecuencia, ha dado muy buenos resultados: después de multitud de ensayos y medidas se pudo correlacionar la situación defectuosa de un rodamiento con la forma de las bandas de modulación alrededor de los máximos resonantes.

En el futuro es necesario un gran esfuerzo investigador para desarrollar programas y algoritmos de detección de defectos a partir de lo obtenido. Por ello sería interesante estudiar más a fondo la influencia de la forma del defecto así como su maduración para desarrollar estrategias de procesado adaptativo al ambiente frecuentemente cambiante en las condiciones de trabajo del sistema mecánico.

Anexo II: Tabla resumen de las tesis

TESIS	CARLOS RODA		HIGINIO RUBIO		MARÍN	OMAR	MARÍA JESUS
AÑO	1995		2003		2009	2007	2014
BANCO ENSAYOS	REDUCTORA PROTOTIPO	MEDIDAS REALES (REDUCTOR, RODAMIENTOS DE BOMBA, TAMBORES CINTA)	REDUCTORA PROTOTIPO	BANCO RODAMIENTOS	BANCO PERSONAL	BANCO RODAMIENTOS	BANCO RODAMIENTOS
RODAMIENTOS	CAJA DE ENGRANAJES		CAJA DE ENGRANAJES	FAG 7206B	SKF 6206 (3 y 9 bolas)	FAG 7206B	FAG 7206B
DEFECTOS	NIBE, ENGRASE	DESGASTE, NIBE, ROTURA PISTAS	VARIOS	NIE	NIE (3 y 9 bolas)	NIBE	NIBE
SIMULACIONES			ALGOR, MATLAB		EC. LAGRANGE Y NEWTON		
TÉCNICAS USADAS	TEMPORAL		TEMPORAL		TEMPORAL	TEMPORAL	TEMPORAL
	FIRMA ESPECTRAL		ENVOLVENTE		ENVOLVENTE		
	ZOOM		ZOOM				
	CEPSTRUM		CEPSTRUM				
	DEMODULACIONES						
	ESPECTROS SELECTIVOS						
			POTENCIA ESPECTRAL				
			POT. ESPECTRAL FREC. SELECTIVAS				
			ESPECTROS POTENCIA		ESPECTRO POT. TEMPORAL		
					ESPECTRO POT. ENVOLVENTE		
			POTENCIA ENVOLVENTE				
			GRÁFICOS TIEMPO-FRECUENCIA		MAPA WAVELET TEMPORAL		
					MAPA WAVELET ENVOLVENTE		
						ANÁLISIS WAVELET	ANÁLISIS WAVELET
						REDES NEURONALES	REDES NEURONALES
RESULTADOS	Defectos elevan los valores de aceleración, mapa técnicas		Técnicas efectivas: pot. espectral y espectro envolvente		Simulación válida	EFFECTIVIDAD 78-92%	EFFECTIVIDAD 95-97%
OTROS	TÉCNICAS TEMPEL, ENGRANAJES		SIMULACIONES		COMPORTAMIENTO VIBRO-TÉRMICO	SISTEMAS HÍBRIDOS	VALIDACIÓN DEL MÉTODO EN EJES
FUTUROS	LÍMITES, CAJAS DE ENGRANAJES		MODELOS TRIDIMENSIONALES, WAVELETS		EVOLUCIÓN TÉRMICA, SIMULACIÓN CON ELEMENTOS RODAMIENTO	OPTIMIZACIÓN, NUEVAS TÉCNICAS, RANGO	HILBERT HUANG, NUEVAS TÉCNICAS, RANGO